

**Análisis geofísico para determinar la posible existencia de lixiviados en el costado
occidental del relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga**

Miguel Fernando Quirós Gómez

**Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Recursos Hídricos y Saneamiento
Ambiental**

Director

Francisco Alberto Velandia Patiño

Magíster en Geología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

AL MOTOR DE MI VIDA, mi pequeña infinidad Amy Lee

A EMPERATRIZ GÓMEZ Y MIGUEL QUIRÓS, porque fueron los cimientos de mis sueños y de mi vida. Porque sus enseñanzas, su perseverancia y dedicación han hecho de mi quien soy hoy día, a ellos gracias totales.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander y a cada uno de los docentes que hicieron parte de esta Maestría por los conocimientos adquiridos en mi formación académica y personal, bases para desempeñarme como un profesional idóneo.

A mi director de proyecto Geólogo. Francisco Alberto Velandia Patiño, por la orientación recibida durante este proceso para poder culminar satisfactoriamente los objetivos propuestos en el Plan de Trabajo.

A los miembros del jurado por asignar parte de su valioso tiempo a este proceso, ya que sus contribuciones serán vitales para mi futuro profesional.

Contenido

	Pág.
Introducción	1
1. Objetivos.....	2
1.1 Objetivo General.....	2
1.2 Objetivos Específicos.....	2
2. Marco Referencial.....	3
2.1. Marco Conceptual.....	3
2.2.1 Hidrogeología. Es muy importante para analizar la estabilidad de un talud, la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual.	3
2.2.2 Cobertura vegetal	6
2.2.3 Sismicidad. La sismicidad de las zonas montañosas es comúnmente alta	6
2.2.4 Efecto Antrópico	7
2.2.5 Ciclo hidrológico	7
2.2.6 Régimen de aguas subterráneas	8
2.2.7 La infiltración.....	8
2.2.8 Flujo de agua subterránea	9
2.3. Marco Legal	10
2.4 Estado del Arte.....	12

2.4.1 Componente Geológico.	12
2.4.2 Componente Hidrológico.....	13
2.4.3 Componente Hidrogeológico.	14
2.4.4 Componente Geoelectrico.....	16
2.4.5 Componente Geotécnico.....	16
2.4.6 Componente General.	18
3. Marco Geológico	19
3.1 Geología local	20
3.1.1 Formación Bucaramanga.	20
4. Metodología	28
4.1. Ejecución del ensayo geofísico en la celda 1 del relleno sanitario El Carrasco.	29
4.2. Descripción de la metodología:	33
5. Resultados y Discusión	36
5.1 Unidades geológicas superficiales (UGS)	37
5.1.1 Unidades de Suelo.....	39
5.1.2 Clasificación de las Unidades de Suelo en El Carrasco.....	44
5.2 Caracterización geotécnica	48
5.2.1 Exploración geotécnica mecánica.....	49
5.2.2 Ensayos de laboratorio	52
5.3 Prospección por Tomografías Eléctricas 2D.....	62
5.3.1 Interpretación tomografía eléctrica 2D T1.....	64
5.3.2 Interpretación tomografía eléctrica 2D T2.....	68
5.3.3 Interpretación tomografía eléctrica 2D T3.....	71

5.3.4 Medidas para mitigar la acumulación de lixiviados en la celda 1 del Carrasco	74
6. Conclusiones	76
7. Recomendaciones	78
Referencias Bibliográficas	81

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Esquema de precipitación e infiltración.....	3
<i>Figura 2.</i> Infiltración del agua en laderas.	4
<i>Figura 3.</i> Ciclo hidrológico.	7
<i>Figura 4.</i> Distribución de presiones en función de la permeabilidad de los materiales.	10
<i>Figura 5.</i> Perfil típico y espesores promedio de la Formación Bucaramanga.....	21
<i>Figura 6.</i> Formación Bucaramanga Miembro Órganos (Qbo), al oeste del Municipio de Bucaramanga.....	23
<i>Figura 7.</i> Formación Bucaramanga Miembro Finos, al norte del municipio de Bucaramanga ...	24
<i>Figura 8.</i> Formación Bucaramanga Miembro Gravoso, al norte del municipio de Bucaramanga	26
<i>Figura 9.</i> Formación Bucaramanga Miembro Limos Rojos.....	27
<i>Figura 10.</i> Equipo SuperSting R8 IP para realizar Tomografías Eléctricas 2-D, 3D Y 4D	30
<i>Figura 11.</i> Dispositivo para prospecciones por Tomografías Eléctricas 2-D y secuencia de medidas.	30
<i>Figura 12.</i> Extendido e instalación de electrodos y multicable para la Tomografía Eléctrica 2D T1	35
<i>Figura 13.</i> Extendido e instalación de electrodos y multicable para la Tomografía Eléctrica 2D T2	35

<i>Figura 14.</i> Extendido e instalación de electrodos y multicable para la Tomografía Eléctrica 2D T3	35
<i>Figura 15.</i> Centro de adquisición de datos para las Tomografías Eléctricas.....	36
<i>Figura 16.</i> Evidencia de erosión laminar en el suelo arenoso del miembro Órganos, presentado zurcos y cárcavas de más de un metro de ancho y profundidad, mientras que de largo cubre todo el talud (aprox. 30 metros).	41
<i>Figura 17.</i> a) Afloramiento del suelo del miembro finos. b) suelo del miembro finos con evidencia de erosión laminar. c) Grietas de desecación en el suelo del miembro finos. d) Suelo del miembro finos.	42
<i>Figura 18.</i> Suelo del miembro gravoso en contacto con el suelo del miembro finos.....	43
<i>Figura 19.</i> Suelo miembro limos rojos.	44
<i>Figura 20.</i> Mapa geológico escala 1:2500 para el área de estudio. Ver Mapa detallado	45
<i>Figura 21.</i> Porcentaje de unidades geológicas superficiales en el área de estudio. Se destaca que el 51.04% equivale a los suelos de llenos antropicos El Carrasco, el 33,41% al suelo gravoso del miembro organos, el 7% a suelos de flujos de escombros.....	46
<i>Figura 22.</i> Imagen satelital de Google earth, ubicación sector de la Celda 1 del Relleno Sanitario El Carrasco, municipio de Bucaramanga, Santander	47
<i>Figura 23.</i> Metodología general para la caracterización geotécnica.	48
<i>Figura 24.</i> Localización de sondeos.	49
<i>Figura 25.</i> Localización de sondeos Explorativos.	50
<i>Figura 26.</i> Localización de Apiques.....	52
<i>Figura 27.</i> Resultados de granulometría.....	53
<i>Figura 28.</i> Carta de plasticidad.....	55

<i>Figura 29</i> Estado del suelo (Límites de consistencia de los suelos).....	56
<i>Figura 30.</i> Estado del suelo (Límites de consistencia de los suelos).....	57
<i>Figura 31.</i> Resumen de corte directo.....	58
<i>Figura 32.</i> Resumen de corte directo, material perteneciente a el miembro Órganos – SFT3 de la formación Bucaramanga.	59
<i>Figura 33.</i> Resumen de corte directo, material perteneciente a llenos antiguos.	60
<i>Figura 34.</i> Resumen de corte directo, material perteneciente a llenos nuevos.....	61
<i>Figura 35.</i> Imagen satelital de Google Earth con la ubicación de las Tomografías Eléctricas 2D T1, T2 y T3 en el sector de la Celda 1 del Relleno Sanitario El Carrasco, municipio de Bucaramanga, Santander.....	63
<i>Figura 36.</i> Imagen Drone con la ubicación de las Tomografías Eléctricas 2D T1, T2 y T3 en el sector de la Celda 1 del Relleno Sanitario El Carrasco, municipio de Bucaramanga, Santander	64
<i>Figura 37.</i> Imagen 2D de inversión y modelización de la Tomografía Geoeléctrica T1.	66
<i>Figura 38.</i> Imagen 2D de Tomografía Eléctrica T.	67
<i>Figura 39.</i> Imagen 2D de inversión y modelización de la Tomografía Geoeléctrica T2.	69
<i>Figura 40.</i> Imagen 2D de Tomografía Eléctrica T2.	70
<i>Figura 41.</i> Imagen 2D de inversión y modelización de la Tomografía Geoeléctrica T3.	72
<i>Figura 42.</i> Imagen 2D de Tomografía Eléctrica T3.	73
<i>Figura 43.</i> Localización medidas correctivas en la celda 1.....	74
<i>Figura 44.</i> Localización drenes de penetración horizontal en la celda 1.....	75
<i>Figura 45.</i> Construcción de pozos de extracción y drenes de penetración horizontal.	75

Lista de Tablas**Pág.**

Tabla 1. <i>Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen</i>	38
Tabla 2. <i>Ensayos de Laboratorio Realizados a las Muestras Obtenidas en Campo</i>	53

Apéndices

Ver apéndices adjuntos en el cd y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS

Apéndice 1. Localización ensayos, Caracterización

Apéndice 2. Ensayo Penetrométrico Dinámico, Dique parte baja

Apéndice 3. Ensayo Penetrométrico Dinámico, Sondeos Carrasco

Apéndice 4. Ensayos de Granulometría y Limites Apiques, Sector 1

Apéndice 5. Ensayos de Granulometría y Limites Apiques, Sector 2

Apéndice 6. Ensayos de Granulometría y Limites sondeos

Apéndice 7. Ensayos de Humedades Carrasco

Apéndice 8. Corte Directo Apique 1

Apéndice 9. Corte Directo Apique 2

Apéndice 10. Corte Directo Apique 3

Apéndice 11. Corte Directo Apique 4

Apéndice 12. Corte Directo Apique 5

Apéndice 13. Corte Directo Apique 6

Apéndice 14. Corte Directo Apique 7

Apéndice 15. Corte Directo Apique 8

Apéndice 16. Corte Directo Apique 9

Apéndice 17. Corte Directo Apique 10

Apéndice 18. Corte Directo Apique 11

Apéndice 19. Corte Directo Apique 12

Apéndice 20. Corte Directo Apique 13
Apéndice 21. Corte Directo Apique 14
Apéndice 22. Corte Directo Apique 15
Apéndice 23. Corte Directo Apique 16
Apéndice 24. Corte Directo Apique 17
Apéndice 25. Corte Directo Apique 18
Apéndice 26. Corte Directo Apique 19
Apéndice 27. Corte Directo Apique 20
Apéndice 28. Corte Directo Apique 21
Apéndice 29. Corte Directo Apique 22
Apéndice 30. Corte Directo Apique 23
Apéndice 31. Corte Directo Apique 24
Apéndice 32. Corte Directo Apique 25
Apéndice 33. Corte Directo Apique 26
Apéndice 34. Corte Directo Apique 27
Apéndice 35. Corte Directo Apique 28
Apéndice 36. Corte Directo Apique 29
Apéndice 37. Corte Directo Apique 30
Apéndice 38. Corte Directo Apique 31
Apéndice 39. Corte Directo Apique 32
Apéndice 40. Corte Directo Apique 33
Apéndice 41. Corte Directo Apique 34
Apéndice 42. Corte Directo Apique 35
Apéndice 43. Corte Sondeo1, 0-1.5

Apéndice 44. Corte Sondeo1, 1.5-2.5

Apéndice 45. Corte Sondeo1, 2.5-3.5

Apéndice 46. Corte Sondeo1, 3.5-4.5

Apéndice 47. Corte Sondeo2, 0-1

Apéndice 48. Corte Sondeo2, 1-2

Apéndice 49. Corte Sondeo2, 2-3

Apéndice 50. Corte Sondeo3, 0-1

Apéndice 51. Corte Sondeo3, 1-2

Apéndice 52. Corte Sondeo3, 2-3

Apéndice 53. Corte Sondeo3, 3-4

Apéndice 54. Corte Sondeo3, 4-5

Apéndice 55. Corte Sondeo3, 5-6

Apéndice 56. Corte Sondeo3, 13-14

Apéndice 57. Corte Sondeo3, 14-15

Apéndice 58. Análisis geológico, geomorfológico y cobertura del suelo

Apéndice 59. Análisis hidrológico

Apéndice 60. Ensayo penetrométrico dinámico

Apéndice 61. Valores comparativos de resistividades en diferentes materiales

Resumen

Título: Análisis geofísico para determinar la posible existencia de lixiviados en el costado occidental del relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga*

Autor: Miguel Fernando Quirós Gómez**

Palabras claves:

Descripción

El incremento en la generación de residuos sólidos es inminente, en el país existe un aumento demográfico considerable y para el caso específico de nuestra región no es una excepción, por ende, se ha generado preocupación de la comunidad en general ya que las administraciones municipales han declarado en repetidas ocasiones emergencia sanitaria y ambiental al relleno Sanitario El Carrasco, en la actualidad los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, San Juan de Girón, Piedecuesta, Lebrija, Rionegro, El Playón, Charta, Surata, Betulia, Santa Bárbara, California, Matanza, Los Santos, Tona y Zapatoca disponen sus residuos sólidos en este relleno.

Es necesario conocer los posibles depósitos de lixiviados por medio del desarrollo en profundidad de la resistividad eléctrica a través de Tomografías Eléctricas 2D; en las cuales se inyecta corriente eléctrica a través del subsuelo mediante un diseño espacial para establecer la diferencia de potencial entre puntos variables, observando los cambios significativos de la resistividad para identificar las características del subsuelo con presencia o ausencia de agua subterránea sin causar daños o problemas de inestabilidad en la superficie de la celda de disposición de residuos sólidos.

En el presente proyecto se recopiló información básica y temática en la zona de estudio, así como los estudios existentes regionales, locales y puntuales del relleno sanitario. Se determinó la ubicación de niveles de lixiviados presentes en la celda 1 del Relleno Sanitario El Carrasco mediante la prospección por Tomografías Eléctricas 2D. Con el objetivo de establecer un óptimo desarrollo en la disposición de residuos sólidos es de vital importancia garantizar la funcionalidad del relleno sanitario, por ende, se realizaron recomendaciones ingenieriles para abatir los niveles de lixiviados identificados.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño, Geólogo

Abstract

Title: Geophysical analysis to determine the possible existence of leachate in the western side of the El Carrasco landfill, Bucaramanga*

Author: Miguel Fernando Quirós Gómez**

Keywords:

Description

The increment in the generation of solid waste is imminent, in the country there is a considerable demographic increase and for the specific case of our region it is not an exception, therefore, there has been concern from the community in general since the municipal administrations have repeatedly declared sanitary and environmental emergency to The Carrasco Sanitary Landfill, currently the municipalities of Bucaramanga, Floridablanca, San Juan de Girón, Piedecuesta, Lebrija, Rionegro, El Playón, Charta, Surata, Betulia, Santa Barbara, California, Matanza , Los Santos, Tona and Zapatoca dispose their solid waste in this landfill.

It is necessary to know the possible deposits of leachates through the development in depth of the electrical resistivity through 2D Electrical Tomography; in which electrical current is injected through the subsoil by means of a spatial design to establish the potential difference between variable points, observing the significant changes of the resistivity to identify the characteristics of the subsoil with presence or absence of groundwater without causing damage or problems of instability in the surface of the solid waste disposal cell.

In the present project, basic and thematic information was collected in the study area, as well as the existing regional, local and specific studies of the sanitary landfill. The location of leachate levels present in cell 1 of The Carrasco Landfill was determined by prospecting by 2D Electrical Tomography. In order to establish an optimal development in the disposal of solid waste, it is vital to guarantee the functionality of the landfill, therefore, engineering recommendations were made to reduce the levels of leachate identified.

* Degree work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Master's Degree in Water Resources and Environmental Sanitation. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño, Geologist

Introducción

Debido al aumento demográfico en la región, el incremento en la generación de residuos es inminente; se ha generado preocupación de la comunidad en general y en las administraciones municipales respecto a la capacidad y al tiempo en el cual el relleno puede seguir operando.

El sitio de disposición de residuos sólidos denominado “El Carrasco” ha tenido a través de su historia múltiples declaratorias de emergencia sanitaria establecidas por los municipios que disponen sus residuos en este relleno; en razón a la última declaratoria de emergencia sanitaria en la cual se permitió que 16 municipios santandereanos continuaron disponiendo sus residuos sólidos en El Carrasco; fue necesario realizar un análisis interdisciplinar en el sector de disposición actual (Celda I de contingencia), para determinar sus condiciones hidrogeológicas y tomar las medidas requeridas para mitigar la posible existencia de lixiviados que pudiesen generar fenómenos de remoción en masa.

De acuerdo a lo anterior, se estructuró una investigación que integró diferentes actividades entre las cuales se encuentran: topografía, caracterización geotécnica por medio de ensayos insitu, exploración geomecánica a través de perforaciones de campo, análisis de los ensayos de laboratorio para caracterización de suelos, análisis hidrogeológico por medio de la prospección por Tomografías Eléctricas 2D, en la zona adyacente al sector de disposición actual y al sistema de conducción y manejo de lixiviados.

La investigación realizada estuvo enmarcada dentro de los análisis técnicos requeridos para garantizar el buen funcionamiento del relleno sanitario respecto a los componentes geotécnicos e hidrogeológicos en la zona adyacente al sitio de disposición actual, implementando así una ejecución de medidas de abatimiento de lixiviados para garantizar su estabilidad geotécnica.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar ensayos Geo-eléctricos mediante la prospección por Tomografías Eléctricas 2D e interpretar los resultados para determinar la presencia de lixiviados en el costado occidental del relleno sanitario denominado El Carrasco del área metropolitana de Bucaramanga.

1.2 Objetivos Específicos

- Efectuar la caracterización geotécnica con la información suministrada por la EMAB Empresa de Aseo de Bucaramanga S.A. E.S.P. respecto a las perforaciones de campo de profundidad variable de entre 7 y 25 metros y el análisis de laboratorios de las muestras obtenidas y de los apiques realizados en la zona de interés.
- Establecer medidas para abatir depósitos de lixiviados de acuerdo a la caracterización geotécnica y análisis geofísico sobre planos topográficos suministrados por la Empresa de Aseo de Bucaramanga S.A. E.S.P.

2. Marco Referencial

2.1. Marco Conceptual

2.2.1 Hidrogeología. Es muy importante para analizar la estabilidad de un talud, la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual. Este modelo debe tener en cuenta las zonas de infiltración arriba de los taludes, incluyendo la infiltración a muchos kilómetros de distancia, siempre y cuando esta agua pueda afectar los niveles freáticos y corrientes de agua (Figura 1). Otros factores a considerar son la conductividad hidráulica mejor conocida como permeabilidad y la porosidad de los materiales del talud. La conductividad facilita la llegada de corrientes de agua y la porosidad afecta la capacidad de almacenamiento de agua en el talud. Se deben identificar además las fuentes, localización y características de los niveles freáticos, corrientes subterráneas y sus fluctuaciones.

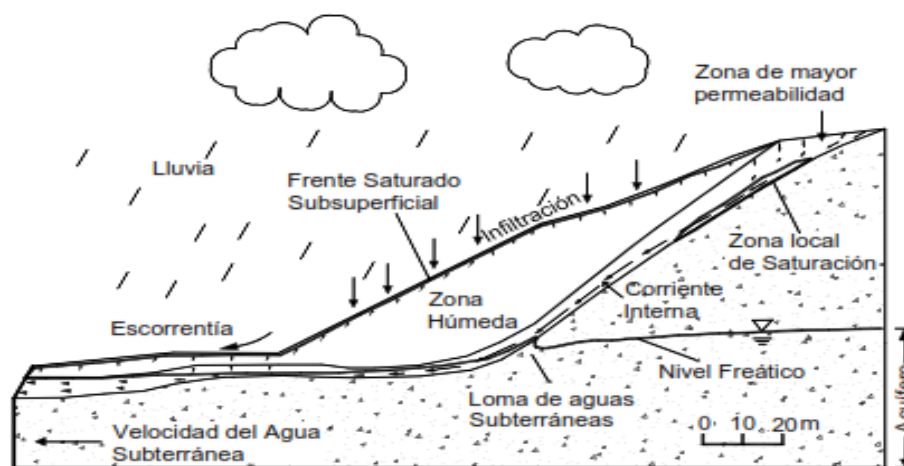


Figura 1. Esquema de precipitación e infiltración. Adaptado de: Suárez 2009

El agua es el factor que más comúnmente se le asocia con las fallas de los taludes, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de precipitaciones fuertes, o durante períodos lluviosos, y de igual forma el control del agua subterránea es uno de los sistemas más efectivos para la estabilización de deslizamientos.

La interpretación más frecuente del efecto del agua es que las lluvias por infiltración saturan el talud (Figura 2) y la presión de poros induce una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante de los materiales, la cual a su vez puede activar un deslizamiento, sin embargo, el proceso no es siempre tan simple y la activación de un deslizamiento por acción del agua es un fenómeno complejo con una gran cantidad de variables.

El análisis hidrológico es uno de los trabajos previos más importantes en el análisis de estabilidad de taludes. La hidrología no es una ciencia exacta y es posible que se obtengan resultados muy diferentes de acuerdo al método que se utilice para el cálculo y la metodología de manejo de la información; por lo tanto, se debe tener un criterio muy claro de los fenómenos para interpretar la información hidrológica.

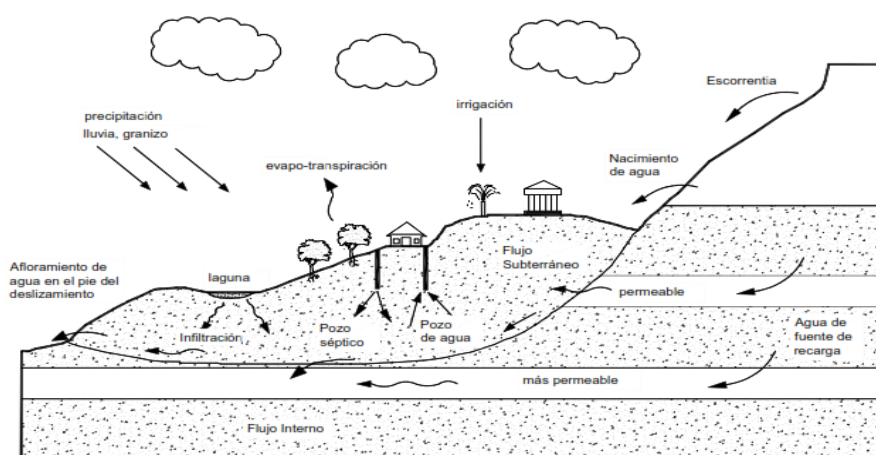


Figura 2. Infiltración del agua en laderas. Adaptado de: Suárez 2009

La relación del efecto del agua sobre la ocurrencia de deslizamientos ha sido estudiada por una gran cantidad de investigadores. Existen evidencias muy claras de la relación directa entre las lluvias y la ocurrencia de deslizamientos de tierra.

Adicional a las infiltraciones de agua lluvia pueden existir otras fuentes de agua como son los cuerpos de agua (canales, cañadas o lagunas) arriba del talud, en los cuales puede ocurrir infiltración localizada.

Los cambios en el sistema hidrológico del talud pueden afectar el comportamiento del mismo. Si el régimen de agua del suelo es alterado drásticamente por irrigación, remoción de la vegetación o inundación parcial, se puede producir inestabilidad de los taludes (Richards, 1985). Entre los factores que afectan el comportamiento de los taludes relacionados con la presencia del agua se encuentran los siguientes:

- Lubricación
- Lavado de cementantes
- Ablandamiento
- Aumento de densidad
- Presiones de poros
- Fuerzas hidráulicas interna
- Tensiones capilares
- Erosión superficial
- Fatiga por fluctuación del nivel freático
- • Erosión laminar, en surcos y en cárcavas

El agua de la lluvia al caer sobre el suelo trata de infiltrarse, desplazando el agua existente hacia abajo por los macro poros, formando una especie de onda de presión de agua dentro del suelo, la cual produce un frente húmedo de infiltración.

El porcentaje de infiltración corresponde a la proporción de lluvia que se infiltra. La infiltración a su vez puede dividirse entre aquella parte que contribuye a aumentar el contenido de agua de la zona no saturada y aquella que recarga el sistema saturado de agua subterránea.

Al inicio de la lluvia la totalidad de la precipitación se infiltra humedeciendo el suelo. La humedad en el suelo antes de la lluvia es determinante en la cantidad de infiltración porque al llover, el agua trata de penetrar al suelo humedeciéndolo y creando una capa delgada de saturación; y hasta que ésta capa no haya llegado a un punto de equilibrio no se forman una escorrentía y una corriente de infiltración.

El equilibrio se logra cuando todo el perfil está transmitiendo agua a la máxima rata permitida por la parte menos permeable de los horizontes. Esto puede ocurrir entre diez minutos o varias horas después de iniciada la lluvia.

2.2.2 Cobertura vegetal. La vegetación cumple efectos protectores importantes en la mayoría de los taludes en cuanto protege contra la erosión y afecta los procesos de evapotranspiración y de infiltración de agua. Las condiciones hidrológicas de un talud son afectadas directamente por la vegetación. La vegetación también cumple un efecto de estabilización por el refuerzo del suelo por acción de las raíces, y por la producción de materia orgánica, la cual puede evitar la infiltración del flujo al suelo sub superficial.

2.2.3 Sismicidad. La sismicidad de las zonas montañosas es comúnmente alta. La mayoría de las cadenas de montañas son el producto de procesos tectónicos o volcánicos. Los movimientos sísmicos a su vez pueden activar deslizamientos de tierra. En el caso de un sismo existe el triple efecto de aumento de esfuerzo cortante, disminución de resistencia por aumento de la presión de poros y deformación asociados con la onda sísmica, pudiéndose llegar a la falla al cortante y la licuación, en el caso de suelos granulares saturados.

2.2.4 Efecto Antrópico. El hombre induce cambios en el medio ambiente de un talud y las actividades humanas tienen una gran influencia sobre su comportamiento y especialmente sobre la activación de deslizamientos. Las actividades antrópicas como el uso de la tierra, las prácticas de agricultura, la construcción de carreteras y la irrigación entre otras son factores determinantes en la ocurrencia de deslizamientos.

2.2.5 Ciclo hidrológico. El agua se encuentra en la naturaleza de diferentes formas, generalmente en continuo movimiento, de acuerdo a un ciclo que incluye las nubes o vapor de agua, la precipitación en forma de lluvia granizo o nieve, la infiltración, la evapotranspiración, la escorrentía, las corrientes subterráneas, los acuíferos, los ríos y quebradas, los mares y los lagos. El agua continuamente está cambiando de forma de acuerdo a un ciclo natural denominado ciclo hidrológico (Figura 3).

Parte de la lluvia se infiltra y parcialmente corre por la superficie como escorrentía.
$$\text{Precipitación} = \text{Evapotranspiración} + \text{Escorrentía} + \text{Flujo subterráneo} + \text{cambio de humedad en el suelo} + \text{Acumulación de agua subterránea en los acuíferos}.$$

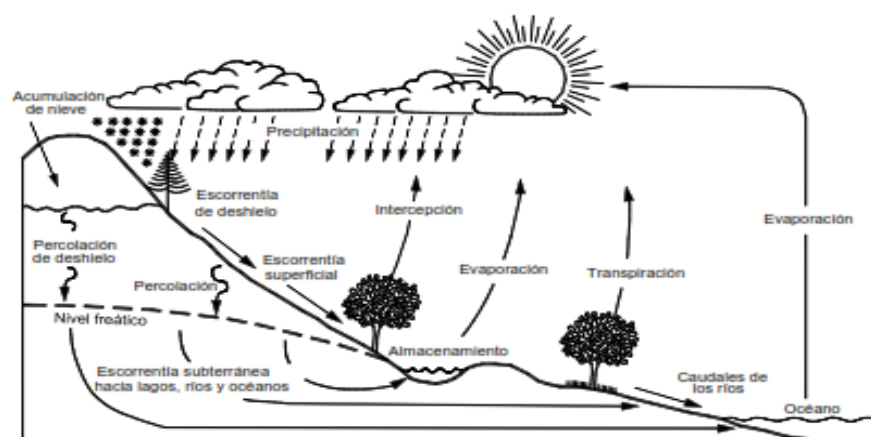


Figura 3. Ciclo hidrológico. Adaptado de: Suárez 2009

La precipitación es el volumen o altura de agua lluvia que cae sobre un área en un período de tiempo, la cual tiene una influencia directa en la infiltración y en el régimen del agua subterránea, y a su vez afecta la estabilidad de taludes o laderas.

La precipitación promedio es muy superior en las zonas tropicales que en el resto del mundo. Estas lluvias son asociadas principalmente con agrupaciones o “clusters” de nubes que se localizan en la zona de convergencia de vientos. Generalmente, estas agrupaciones de nubes arrastradas por los vientos cubren áreas de varios miles de kilómetros cuadrados.

2.2.6 Régimen de aguas subterráneas. La respuesta del régimen de aguas subterráneas a las lluvias es diferente de acuerdo al talud, la formación geológica y las características ambientales. Existe una respuesta inmediata a la lluvia por infiltración en las zonas cercanas al talud y una respuesta regional por las lluvias infiltradas en toda el área de aferencia alrededor del talud.

2.2.7 La infiltración. El agua de la lluvia al caer sobre el suelo trata de infiltrarse, desplazando el agua existente hacia abajo por los macro poros, formando una especie de onda de presión de agua dentro del suelo, la cual produce un frente húmedo de infiltración.

El porcentaje de infiltración corresponde a la proporción de lluvia que se infiltra. La infiltración a su vez puede dividirse entre aquella parte que contribuye a aumentar el contenido de agua de la zona no saturada y aquella que recarga el sistema saturado de agua subterránea.

Al inicio de la lluvia la totalidad de la precipitación se infiltra humedeciendo el suelo. La humedad en el suelo antes de la lluvia es determinante en la cantidad de infiltración porque al llover, el agua trata de penetrar al suelo humedeciéndolo y creando una capa delgada de

saturación; y hasta que ésta capa no haya llegado a un punto de equilibrio no se forman una escorrentía y una corriente de infiltración.

El equilibrio se logra cuando todo el perfil está transmitiendo agua a la máxima rata permitida por la parte menos permeable de los horizontes. Esto puede ocurrir entre diez minutos o varias horas después de iniciada la lluvia.

2.2.8 Flujo de agua subterránea. El agua infiltrada por las lluvias penetra en el suelo en forma semi-vertical hasta encontrar un manto de alta conductividad hidráulica (permeabilidad) que facilita la formación de una corriente, o uno semi-impermeable, que impide su paso y obliga a la formación de una corriente de agua paralela a la superficie de baja conductividad hidráulica (permeabilidad). Estas corrientes subterráneas pueden ser temporales o permanentes, las cuales tienen una distribución de presión en función de la permeabilidad de cada uno de los materiales (Figura 4).

La determinación de las características del flujo del agua subterránea puede realizarse utilizando la teoría de flujo basado en la ley de Darcy. Existe una gran cantidad de soluciones gráficas, numéricas y software para la solución de los problemas de flujo de aguas subterráneas (Abramson y otros, 2002).

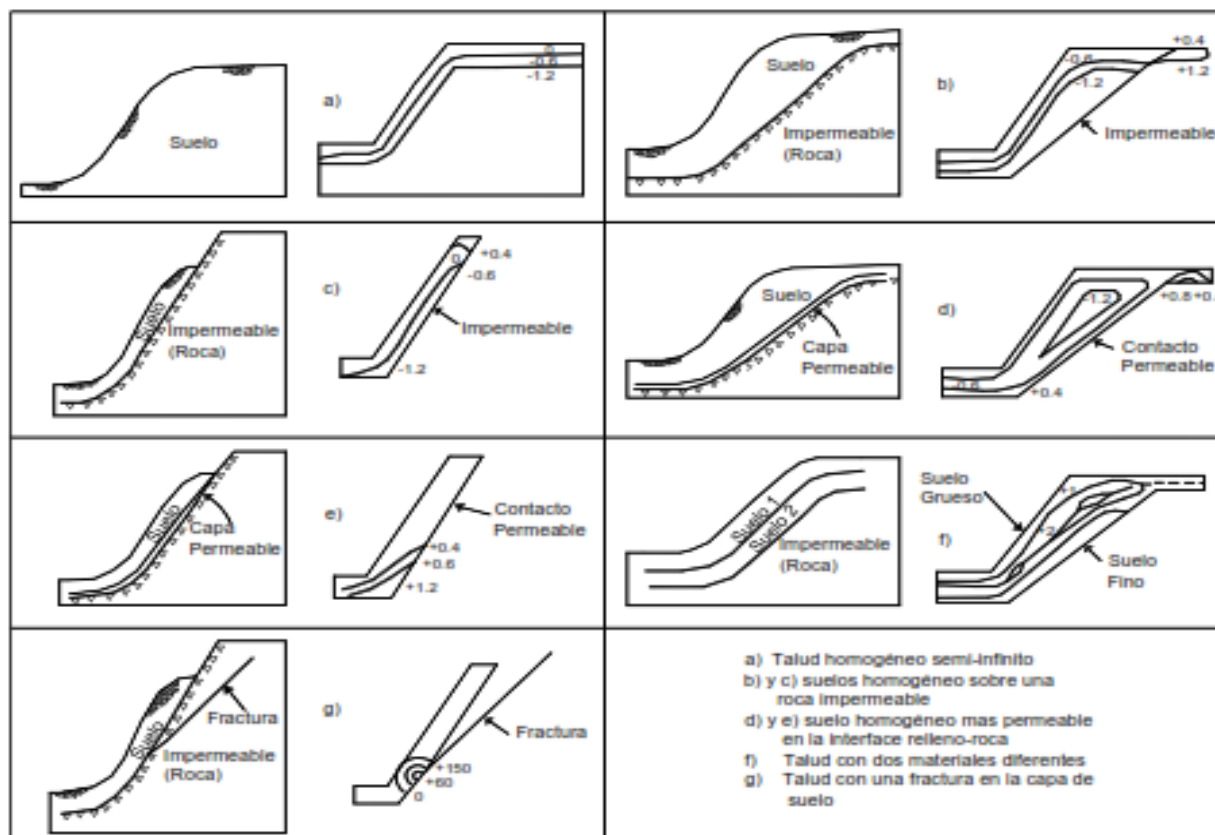


Figura 4. Distribución de presiones en función de la permeabilidad de los materiales. Adaptado de: Vargas y otros 1990

2.3. Marco Legal

Resolución 1294 del 29 de diciembre de 2009 “*normas geotécnicas para el control de la erosión y para la realización de estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos*” (2009): En esta norma se da la base o requerimiento para la realización de estudios detallados, allí se dan a conocer parámetros esenciales como la determinación de los niveles de detalle de la topografía, así mismo la forma como se debe realizar la evaluación de amenaza por métodos determinístico tomando los límites por factores de seguridad.

Ley 1523 de 24 de Abril de 2012, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.

Decreto 4002 de 2004, Establece la revisión de los Planes de ordenamiento territorial y establece las evaluaciones sobre amenazas, vulnerabilidad y riesgo.

Ley 388 de 1997, Establece los mecanismos para que los entes territoriales organicen y gestionen el Uso de Suelo, permitiendo que los propietarios se ajusten a la función social de la propiedad y permitiendo el derecho constitucional a la vivienda, protección del medio ambiente y prevención de desastres, determina por tanto las políticas y mecanismos para evitar asentamientos en zonas de alto riesgo natural.

Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000, La Dirección General de Agua Potable y Saneamiento Básico del Ministerio de Desarrollo Económico entrega al país esta primera actualización de los títulos B-Sistemas de Acueducto, C-Sistemas de Potabilización, D-Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales, El Tratamiento de aguas residuales, F-Aseo Urbano y G-Aspectos complementarios.

Resolución 1294, Normas técnicas para el control de erosión y para la realización de estudios geológicos geotécnicos e hidrológicos La Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga-CDMB busca unificar los criterios, requerimientos y parámetros geotécnicos para los estudios y diseños técnicos relacionados con los proyectos de desarrollo, públicos o privados en la totalidad del área de jurisdicción de la CDMB con el objetivo de evitar o mitigar las amenazas geotécnicas y en esta forma proteger la vida, la integridad y el bienestar de la comunidad.

2.4 Estado del Arte

2.4.1 Componente Geológico. Julivert (1958) detalla en la región las diferentes morfologías presentes en el área, como su origen estructural y su énfasis según la estratigrafía en el área (Detalle de columnas geológicas levantadas y creación de mapa geológico del área). De igual forma en (1959) presenta un detalle de toda el área oeste del macizo de Santander hacia el área de Bucaramanga, donde se especifican los diferentes materiales Jurásicos, Cretácicos y Paleógenos/Neógenos vistos en áreas como Tona, Matanza, Suratá, California. A su vez se especifica todo el contexto tectónico del área, en donde la predominancia de fallas se da en un sentido N-S de tipo inverso, afectando rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Ese mismo año J. de Porta (1959) describen de manera detallada la estratigrafía comprendida entre el área de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Lebrija en la cual se especifica y hace referencia a las denominaciones dadas por Hubach (1952), para cada una de las unidades nombradas por él. Se define a su vez la relación hidrográfica con la geología. Entretanto Ward (1977) da énfasis a todas las estructuras presentes en el área, fallas geológicas, pliegues, depresiones estructurales, y todo un detalle puntual de las formaciones geológicas vistas a lo largo de esta gran área. Se da una recopilación breve y un detalle general sobre el material asociado a la Formación Bucaramanga, nombrando los estudios anteriormente descritos (De Porta, 1959 y Julivert 1959), como también otros dados por estos mismos autores. De porta (1959) y Julivert (1963), en su analisis geologico establecen que la zona más significativa del área metropolitana de Bucaramanga se encuentra ubicada dentro de depósitos de terraza y de cono aluvial (Ward et al., 1973) en la Terraza de Bucaramanga, de edad Pleistoceno-Holoceno. La parte inferior de la Terraza de Bucaramanga está compuesta de grava, arena, limo y capas menores arcillosas

fluviales; mientras la parte superior está compuesta de cantos no calibrados que se interpretan como depósitos coluviales, los cuales adelgazan lejos del frente montañoso, presentan un gradiente superficial más grande que el de los depósitos fluviales subyacentes y están restringidos a una zona paralela a lo largo de los valles. Posteriormente INGEOMINAS hoy SGC (1999) presenta el mapa geológico para el departamento de Santander y actualmente se usa como contexto regional debido a su escala para la categorización geológica levantada en campo. Luego Royero y Clavijo (2001) publican el mapa geológico generalizado del Departamento de Santander a escala 1:400.000 en el cual se especifica de manera general todo el contexto evolutivo geológico del área del Departamento de Santander, como también las unidades geológicas y las diferentes estructuras a nivel regional.

2.4.2 Componente Hidrológico. IDEAM-CDMB (2005) compilan información correspondiente a los datos de precipitación obtenidos en los diferentes sectores donde se realiza un monitoreo en el régimen de lluvias, entre las estaciones más importantes están, la estación del aeropuerto Palonegro, la estación de la UIS, la estación de la Flora, entre otras. A su vez INGEOMINAS hoy Servicio Geológico Colombiano (2009), presenta una cartografía y definición de unidades para las diferentes cartografías temáticas, las cuales fueron reasignadas por estos autores para el área metropolitana teniendo en cuenta las nomenclaturas cartográficas a nivel nacional e internacional. Con esto, lograron crear una serie de unidades específicas que se ajustan al Área metropolitana a escala detallada (1:5000), las cuales serán usadas en los informes a desarrollar para el proyecto. Por otra parte, la CDMB (2010) realizó el análisis de la cuenca media y baja de Río Frio, el cual arrojó las cotas máximas de inundación en todo el recorrido

con diferentes periodos de retorno para zonificar la amenaza por inundación en la cuenca baja y media del río frío (municipio de Floridablanca y Girón.

2.4.3 Componente Hidrogeológico. INGEOMINAS (2002) realizan un estudio a partir de análisis de inventarios de puntos de recolección de aguas en diferentes zonas del área metropolitana de Bucaramanga para evaluar el agua subterránea y encontraron diferentes tipos de acuíferos:

- **Acuífero Órganos:** Este acuífero fue captado por 13 pozos de los cuales 6 de ellos se tienen lecturas de niveles estáticos del agua subterránea. Los niveles se encuentran entre 3.2 a 37.5 m, encontrándose los niveles más profundos hacia la parte occidental del acuífero, es decir, hacia la escapa occidental de la ciudad de Bucaramanga. Este también fue captado por 6 aljibes de los cuales 5 de ellos se tienen lecturas de niveles estáticos del agua subterránea. Los niveles se encuentran a profundidades que fluctúan entre 0.1 a 19 m y al igual que sucede con los niveles estáticos medidos en los pozos, los niveles más profundos se encuentran hacia la parte occidental del acuífero.

- **Acuífero Gravoso:** Se encuentran 12 pozos de los cuales para 7 de ellos se tienen lecturas de niveles estáticos del agua subterránea. Los niveles se encuentran a profundidades que van de 2.65 a 22.2 m; al igual que para el acuífero Órganos los niveles más profundos están hacia la parte occidental del acuífero, es decir hacia la escapa occidental de la ciudad de Bucaramanga.

- **Acuífero Terrazas y depósitos aluviales:** Captado por 19 aljibes de los cuales 17 de ellos se le puede medir el nivel estático. Los niveles varían entre 0 y 9.2m, predominando los niveles someros.

- **Acuífero depósitos coluviales:** Los niveles estáticos oscilan entre 1.4 a 13.7 m. en cuatro aljibes se pudo medir el nivel estático y va de 0.9 a 2.2 m.

- **Acuífero Macizo de Santander:** Se encuentra entre los 1400 a 3370 m, siendo 1600-200 m el intervalo de altura más predominante.

- **Acuífero Girón:** Captado por 11 pozos de los cuales a 6 de ellos fue posible medirles el nivel estático, el cual fluctúa entre 0.4 y 9.5 m.

Por otra parte, el INGEOMINAS (2004) realiza el modelo geológico-geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga por medio de la recopilación de sondeos eléctricos verticales realizados por el INGEOMINAS en 2001 y 2002 mostrando un modelo geo-eléctrico preliminar, que sirve como base para observar el comportamiento en las diferentes zonas en estudio. Entretanto, el Ministerio de minas y energía, INGEOMINAS-UIS (2007) efectúan el estudio que comprende un área de 134 km² del macizo de Santander como zona de recarga para abastecer a la población de agua potable debido a las limitaciones que existen, en él se evalúa un balance hídrico a largo plazo. Se plantea finalmente un modelo conceptual de recarga y circulación de agua subterránea a través de la zona del Macizo de Santander, teniendo en cuenta la complejidad estructural de toda el área, la distribución litológica y la presencia de importantes espesores de roca meteorizada. Estos tres aspectos se constituyen como protagonistas del proceso de infiltración y flujo del agua en el Macizo de Santander. En ese estudio se contó con el uso del modelo de recarga y circulación del flujo para comparar con lo encontrado en cada sector analizado.

2.4.4 Componente Geoeléctrico. Wenner Frank (1915) desarrolla la teoría que lleva su nombre, la cual tiene por objeto medir resistividad del suelo con el uso de electrodos ubicados en línea recta con igual profundidad y separación entre ellos. El principio básico corresponde a la inyección de corriente directa en el suelo con corriente a baja frecuencia entre dos electrodos en los cuales se miden los diferenciales de potencial. La función de la resistencia con la geometría de los electrodos corresponde a la resistividad aparente del terreno. Posteriormente Schlumberger modificó el método de Wenner variando la distancia de los electrodos exteriores respecto a los electrodos interiores para realizar las mediciones de potencial, este método presenta ventajas adicionales ya que se pueden conocer las resistividades del suelo a mayor profundidad y requiere menos mediciones que el método de Wenner. Por otra parte, INGEOMINAS (1997) realizó la microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá, estableciendo propiedades geofísicas, resistividad eléctrica, velocidad de ondas de compresión a través de ensayos de resistividad eléctrica y sísmica para establecer el modelo único de las cuecas encontradas en la capital del país. A su vez, Auge (2008) indica diferentes configuraciones para realizar mediciones con distribuciones y modelos para desarrollar perfiles hidrogeológicos y sondeos eléctricos verticales en acuíferos. De igual manera, Arias (2011) indica la relación entre las características del geo material y la resistividad eléctrica en suelos originados de rocas cristalinas en el altiplano central del departamento de Antioquia con exploraciones y ensayos que corresponden a sondeos eléctricos verticales.

2.4.5 Componente Geotécnico. Gómez Sully (1989) recopila información meteorológica, piezométrica e información de deslizamientos del área metropolitana de Bucaramanga con el fin de observar el comportamiento de los niveles freáticos con base en las precipitaciones y su

influencia en la escarpa occidental en lo que corresponde a la ocurrencia de deslizamientos. Por otra parte, Bueno y Solarte (1994) realizan una recopilación bibliográfica general y se enfatiza en el análisis geológico, geomorfológico, hidrogeológico y geotécnico con la finalidad de establecer las causas de los diferentes comportamientos de los materiales geológicos y determinar así zonas propensas a erosión en áreas de reserva forestal de Bucaramanga. De igual manera, INGEOMINAS (2001) desarrolla para el área metropolitana la zonificación sismo geotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, con identificación de unidades lito estratigráficas, unidades geomorfológicas, exploración geofísica del subsuelo, caracterización geotécnica del subsuelo y zonificación geotécnica de toda el área metropolitana de Bucaramanga, que sirve como base para realizar el análisis geológico local y para el análisis sísmico de la zona de estudio. La autoridad ambiental CDMB (2009) desarrolla una norma para el análisis a fenómenos de remoción en masa, para ello se toma los factores de seguridad para la evaluación determinística en condiciones pseudo-estáticas del modelo geológico geotécnico, de igual forma se contemplan recomendaciones para detallar los estudios geológicos, hidrológicos y geotécnicos; ese mismo año INGEOMINAS presenta la zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta, el cual cubrió un total de aprox. 5000 Ha. En el estudio se muestran cartografías geológicas, geomorfológicas, cobertura vegetal y uso del suelo a escala 1:5000, como también análisis de subsuelo y ensayos de laboratorio. También se desarrolla el inventario de movimientos en masa y se zonifica la amenaza a movimientos en masa mediante métodos semi-cuantitativos, donde se plantean obras de prevención, corrección o control de estos fenómenos.

2.4.6 Componente General. INGEOMINAS (2007) establece que regionalmente el área metropolitana de Bucaramanga está relacionada a los bloques tectónicos delimitados por la falla de Suárez al occidente y la falla Bucaramanga al oriente. Se tiene en cuenta la información base el estudio de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga (2001).

Análisis geológico estructural: el segmento septentrional de Suramérica en donde se encuentran la cadena montañosa de los Andes de Ecuador, Colombia y Venezuela ha sido reconocida como el Bloque Nor-andino el cual corresponde a un segmento geológicamente diferente de la Cordillera de Los Andes (Cediel et al., 2003) ya que es un territorio geológicamente complejo y tectónicamente dinámico (Royero y Clavijo, 2001), en donde ocurre la interacción de tres placas litosféricas principales: la Placa de Nazca ubicada en el Pacífico, la Placa Caribe y la Placa Suramericana en donde se incluye el Bloque Norandino (Cediel et al., 2003; Royero y Clavijo, 2001)

Análisis Geomorfológico: en este trabajo se utiliza la misma metodología y nomenclatura implementada en el Área Metropolitana de Bucaramanga (INGEOMINAS, 2009) con el fin de evitar confusión con el manejo de nuevos términos y/o unidades geomorfológicas. Estas se encuentran basadas en los principales orígenes geomorfológicos según el Sistema ITC de Holanda (Verstappen & Van Zuidam, 1975; Verstappen, 1983; Van Zuidam, 1986).

Análisis sísmico: este análisis parte de la definición del tipo de suelos, elemento importante ya que este es el medio de propagación de la onda, es así que para su determinación, es necesario acudir al número de golpes promedio, dentro del apéndice A4 del título A de la NSR-10, se verifica algunas características propias de cada municipio apareciendo los índices de amplificación Aa, Av, Ad y Ae, además de la categoría de la amenaza sísmica (baja, mediana o

alta), así mismo el estudio de zonificación sísmica da a conocer el Amax que ocurre cuando el periodo de la onda sísmica es cero, todo lo anterior es la base del el sismo de diseño nombrado por la NSR-10 en su título H como Kst, y es este valor el que se ingresa a un modelo geológico geotécnico para determinar la estabilidad de cada zona en estudio cuando se analiza de manera pseudo – estática.

Análisis de uso del suelo: el análisis de usos del suelo es indispensable para el estudio puntual de los procesos de afectación por remoción en masa. Este se basa en la implicación de la utilidad que presta un tipo de cobertura al ser humano, es decir, las funciones económicas o actividades humanas dentro de una porción específica de la tierra (Janssen, 2000 en SIAC; 2014).

Análisis Hidrológico: este se fundamenta principalmente en los datos de precipitación recopilados de las estaciones meteorológicas del IDEAM y CDMB, en las cuales por medio de análisis estadísticos y mediante el uso de métodos convencionales conocidos y técnicamente aprobados, se estiman caudales o régimen de caudales útiles para determinar medidas de protección relacionadas con este tema en particular.

3. Marco Geológico

Este capítulo describe las características geológicas y las unidades geológicas superficiales a nivel local, teniendo en cuenta estudios previos de entidades oficiales y particulares, dentro de las que se encuentran la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), la oficina de planeación del municipio de Bucaramanga y Servicio

Geológico Colombiano, los cuales permiten conocer la información geológica desarrollada en el área a escalas generales, de igual manera se usaron mapas topográficos, imágenes satelitales e imágenes obtenidas por un dron, los cuales permiten estudiar los rasgos morfoestructurales y los procesos morfodinámicos presentes en la zona de estudio.

A partir de la información obtenida se genera el mapa de unidades geológicas superficiales en el área de trabajo.

3.1 Geología local

3.1.1 Formación Bucaramanga. La Formación Bucaramanga hace parte de los depósitos cuaternarios descritos por Ward *et al.*, (1973). Esta unidad inicialmente fue propuesta por Hubach (1952), quien la subdivide en: Miembro Órganos (Qbo) y Miembro Finos (Qbf). Posteriormente De Porta (1959) divide la formación Bucaramanga en tres paquetes: uno inferior conformado por niveles discontinuos de gravas clasto soportados y con lentes arenosos intercalados con un espesor de 150m; un segundo paquete con un espesor de 18m ubicado en la parte superior, compuesto de sedimentos arcillosos y un tercer paquete de 8 a 15 metros de espesor, constituido por una mezcla de fragmentos angulares gruesos y finos arenosos. Sin embargo, después de trabajos de campo detallados el INGEOMINAS subdivide esta unidad en cuatro miembros: Órganos (Qbo), Finos (Qbf), Gravoso (Qbg) y Limos Rojos (Qblr); de acuerdo con las dataciones publicadas en el proyecto hidroeléctrico Fonce-Suárez, la edad de la Formación Bucaramanga es menor que 730.000 años (Pleistoceno) (INGEOMINAS, 1997).

Morfológicamente esta unidad corresponde a un abanico aluvial erosionado posiblemente asociado en gran parte al Río Suratá, acumulado sobre una depresión de origen tectónico, sobre

la cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Este abanico limita al nororiente y oriente con el Macizo de Santander, al noroccidente y occidente con el Cerro de Palonegro y el Río de Oro, y al sur con la Mesa de Ruitoque. Presenta una superficie suavemente ondulada, con pendiente ligeramente inclinada al occidente, entre 2° y 7°, y una extensión aproximada de 60 a 80 km². El valor real del espesor de la Formación Bucaramanga es aún desconocido, sin embargo, a partir de cortes geológicos se ha estimado un valor promedio de 250m en las zonas con mayor espesor.

El ambiente de depositación de esta unidad ha sido considerado como un ambiente fluvial, con alternancia de materiales de origen aluvial tipo cono de deyección, flujos de escombros, canal y lagunar, en base a la granulometría que presentan dichos materiales, los rasgos geomorfológicos que presenta esta formación, así como los posibles agentes de transporte y la fuente de los materiales (Julivert, 1958).

En la Figura se muestra de manera esquemática el perfil del subsuelo correspondiente a la Formación Bucaramanga.



Figura 5. Perfil típico y espesores promedio de la Formación Bucaramanga. Tomado de: INGEOMINAS, (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, Colombia

A continuación, se describen las características geológicas de cada uno de estos miembros, de acuerdo con la información geológica que se presenta en los estudios del INGEOMINAS (2001).

3.1.1.1 Miembro Órganos (Qbo): Esta unidad fue definida por Hubach (1952) y presenta un espesor mayor a 180m, siendo este el más potente de la Formación Bucaramanga y el que más se presenta en el área de estudio ya que está distribuido bordeando el relleno. Presenta una serie de niveles polimícticos de fragmentos gruesos de aspecto conglomerático, con alternancia de capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura, según Bueno y Solarte (1994). Los niveles lenticulares descritos por Hubach (1952), algunos son niveles limo-arenosos de hasta 5 m; otros son niveles de aspecto conglomerático que forman los depósitos de gravas y bloques poco consolidados dispuestos en forma de capas gruesas a muy gruesas, con espesores hasta de 15 m.

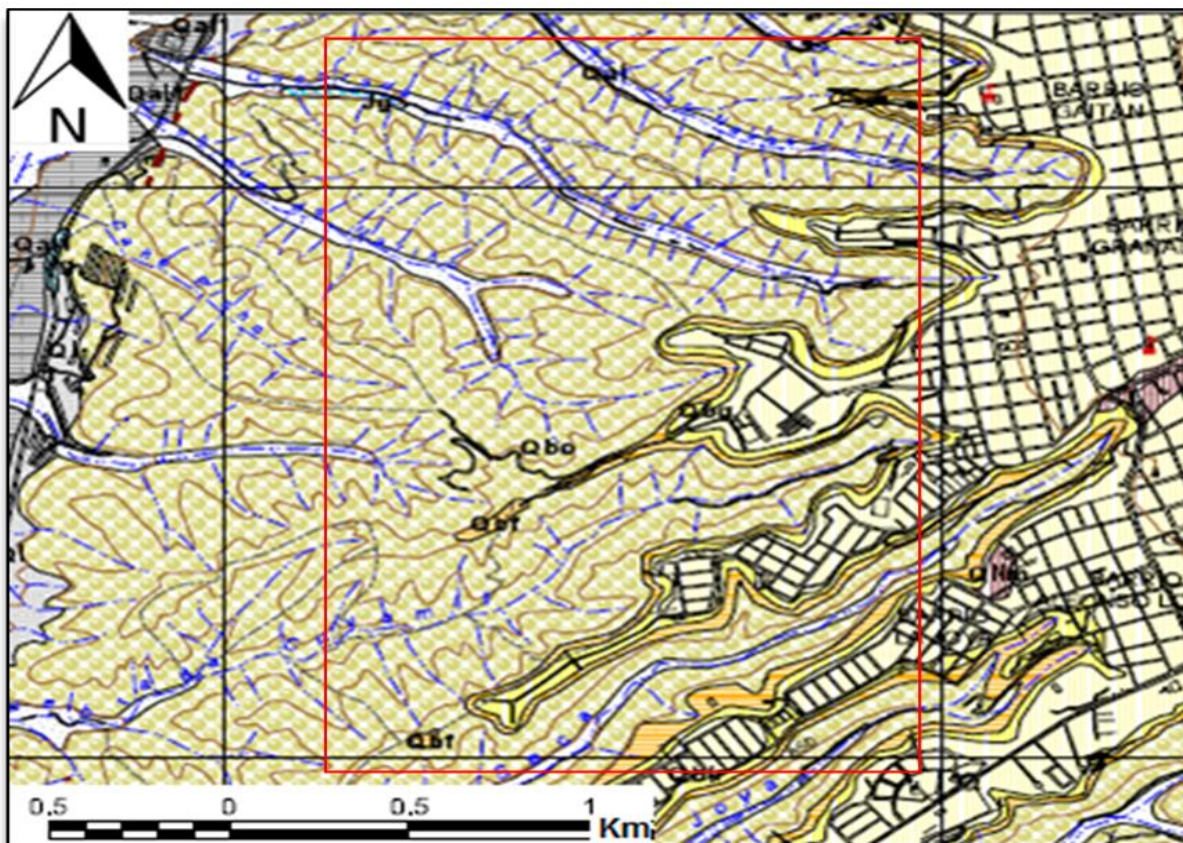


Figura 6. Formación Bucaramanga Miembro Órganos (Qbo), al oeste del Municipio de Bucaramanga. Tomado de: INGEOMINAS, (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, Colombia

El tamaño de los cantos varía entre 10 y 30 cm, alcanzando bloques mayores de 1 m de diámetro con una composición predominante de areniscas silíceas de grano medio, bien cementadas y en menor proporción fragmentos de rocas ígneas ácidas de textura fanerítica, neises micáceos de color amarillo hasta rosado, areniscas lodosas rojizas de grano fino y alto contenido de micas, cuarzo lechoso, liditas y cherts. Los niveles gravosos presentan matriz arcillosa pardo amarillenta y los niveles finos presentan material arcillo arenosos y areno arcilloso de consistencia compacta, con trazas de materia orgánica (Figura).

The map shows the study area in Bogotá, Colombia. It includes a north arrow and a scale bar from 0 to 1 Km. The map is divided into several colored regions: yellow (Barrio Kennedy), green (Barrio Villavieja), and red (Barrio San Mateo). The four study sites are marked with red dots and labeled Qa1, Qa2, Qa3, and Qa4. A red dashed line outlines the study area. The map also shows the locations of the Barrios Kennedy, Villavieja, and San Mateo.

Figura 7. Formación Bucaramanga Miembro Finos, al norte del municipio de Bucaramanga

Tomado de: INGEOMINAS, (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, Colombia

Hacia la base el Miembro Finos presenta material arcillo-limoso, masivo, de colores grises a verdes, con estratificación plana paralela, con gran variación de espesor. Hacia el techo presenta alternancia entre niveles areno limosos con niveles limo arenosos arcóscicos de colores amarillento a pardo amarillento.

Geomorfológicamente se caracteriza por presentar escarpes con un grado de alteración moderada de consistencia plástica para el material arcilloso (Figura). El ambiente de depositación para este miembro de la Formación Bucaramanga, es un ambiente aluvial de intercanales, poco profundo, de baja energía y de escasas interdigitaciones de flujo de escombros de facies arenosas (INGEOMINAS, 2001).

3.1.1.3 Miembro Gravoso (Qbg): Definido por Niño y Vargas (1992), se encuentra ubicado sobre la escarpa occidental y norte de Bucaramanga (Figura). Conforman los escarpes superiores de la parte alta del barrio La Gran Ladera y el nacimiento de la quebrada La Iglesia, en los alrededores de los barrios Lagos del Cacique, Diamante II y San Luis. Presenta un espesor que varía entre 8 y 30 m. presentando niveles gravosos, gravo arenosos y gravo lodosos. Los cantos están compuestos por rocas metamórficas e ígneas y sedimentarias tales como areniscas cuarzosas, areniscas limosas y limolitas moradas. El tamaño grava presenta un diámetro promedio de 15 cm, y predomina sobre bloques de rocas de hasta 80 cm de diámetro. A modo general el Miembro Gravoso es matriz soportado, presentando en sitios puntuales, material clasto soportado (Figura 8). Se encuentra suprayaciendo el Miembro Finos presentando contacto neto, continuo y suavemente ondulado. Infrayace el Miembro Limos Rojos en contacto gradacional (Niño y Vargas, 1992).

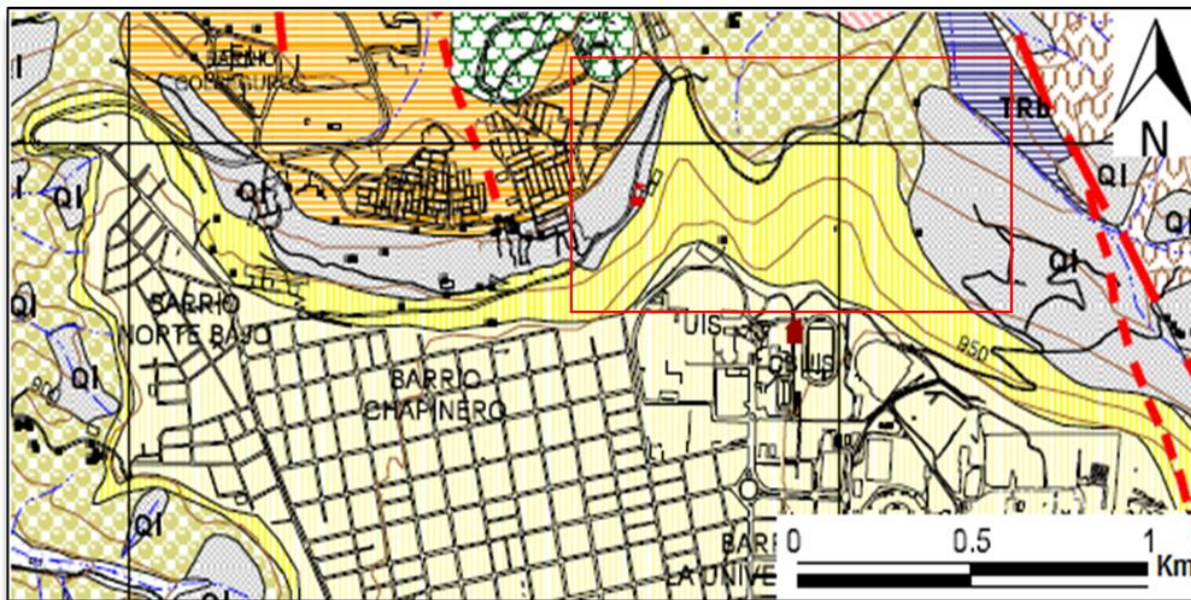


Figura 8. Formación Bucaramanga Miembro Gravoso, al norte del municipio de Bucaramanga Tomado de: INGEOMINAS, (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, Colombia

Geomorfológicamente es similar al Miembro Órganos en los sectores de los valles de las quebradas. En la parte sur de la Quebrada la Iglesia, su morfología se caracteriza por presentar colinas suaves onduladas y laderas alargadas con un drenaje dendrítico. Estos depósitos presentan un grado de meteorización medio a alto, siendo la parte superficial de este miembro poco compacta y altamente permeable. Su ambiente de depositación es de flujo de escombros (INGEOMINAS, 2001).

3.1.1.4 Miembro Limos Rojos (Qblr): Nivel definido por Julivert (1963). Se encuentra localizado de forma no uniforme en el sector urbano de Bucaramanga y continúa hacia el sur, hasta el sector norte del municipio de Floridablanca, en el área de estudio no se encuentran afloramientos de este miembro.

Presenta arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. En algunos sectores se aprecian bloques angulares de arenisca meteorizados, embebidos dentro de limos rojos y se asocian superficialmente a este miembro. Este depósito se encuentra suprayaciendo el Miembro Gravoso en contacto gradacional (Figura). La parte más superficial de este miembro presenta un alto grado de meteorización formando niveles de oxidación (INGEOMINAS, 2001). Geomorfológicamente se caracteriza por constituir la parte superficial de la llamada inicialmente “Meseta de Bucaramanga”, presentando una topografía plana con pendientes menores al 7%, de drenaje escaso, paralelo y superficial (Niño y Vargas, 1992).

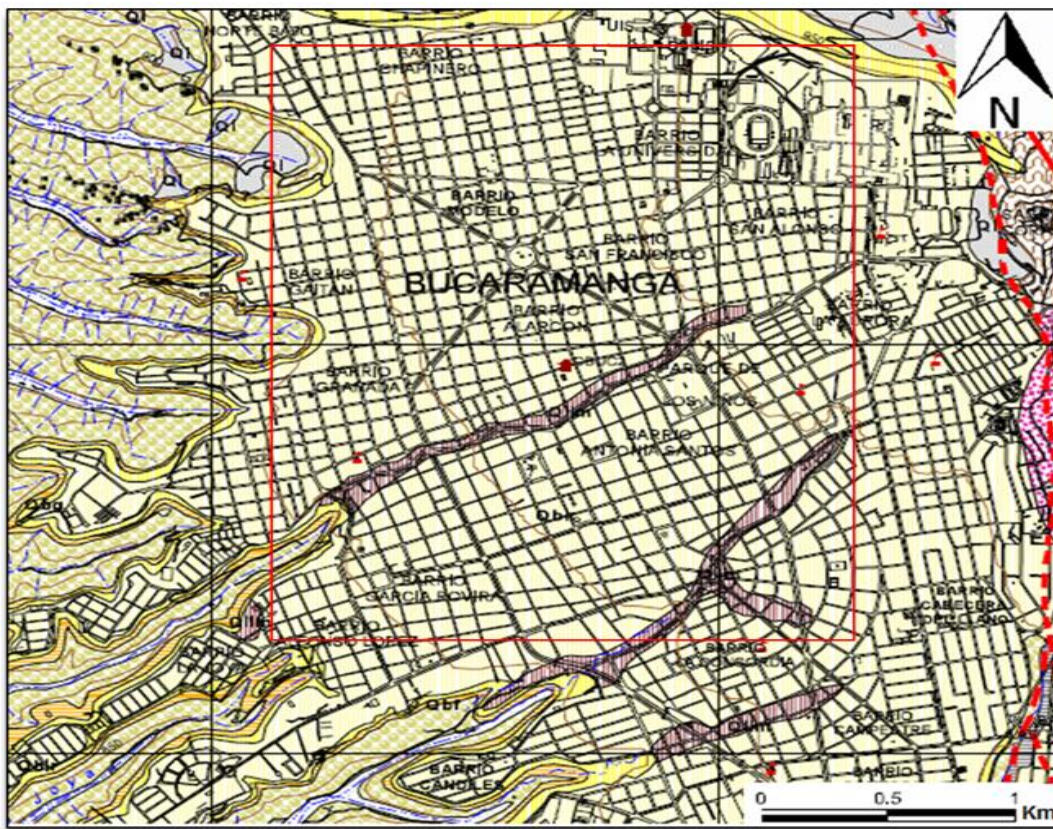


Figura 9. Formación Bucaramanga Miembro Limos Rojos. Tomado de: INGEOMINAS, (2001).

Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, Colombia

En el área de estudio hace parte de la zona morfológica con menor pendiente, en la geoforma denominada Superficie del Abanico de Bucaramanga, hacia el límite con el Barrio El Porvenir.

4. Metodología

Para la ejecución del Estudio Geoelectrico en la celda 1 del relleno sanitario El Carrasco se efectuaron cinco (5) fases o etapas de trabajo que incluyeron las siguientes actividades:

Fase de Recopilación Bibliográfica: se consultó y seleccionó material bibliográfico, informes técnicos, artículos científicos, mapas geológicos y memorias explicativas; los cuales permite definir las nomenclaturas de geología, geomorfología, cobertura del suelo, tomando como base los lineamientos usados por el Servicio Geológico Colombiano y antes a nivel local Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB).

Fase de Reconocimiento Lito-Estratigráfico y Estructural: Realizada en los alrededores del área del proyecto, con el fin de reconocer la geología local, estratigrafía, geomorfología, inclinación (actitud) de las capas de roca en superficie y constatar e identificar los principales agentes hídricos.

Fase de Adquisición de Datos: Efectuada con la visita de anterioridad y puntual al predio del proyecto para planear la ubicación y ejecución de tres (3) Tomografías Eléctricas 2D T1, T2 y T3 con 56 electrodos espaciados cada 6.00, 7.00 y 6.00 m respectivamente.

Fase de Valoración de Información: Revisión bibliográfica y análisis de la Información geológica existente de superficie y subsuelo, para el sector del estudio.

Fase de Procesamiento e Interpretación: Con los datos adquiridos de las fases anteriores y utilizando software de inversión y modelización AGI EarthImager 2D para el procesamiento e interpretación de los datos de las Tomografías Eléctricas 2D T1, T2 y T3.

4.1. Ejecución del ensayo geofísico en la celda 1 del relleno sanitario El Carrasco.

Objetivo: Realizar la medición de los valores de resistividad del subsuelo lateral y verticalmente en la línea de medición, de acuerdo al área establecida inicialmente.

Norma: ASTM D6431, Guía estándar método de resistividad continua para la investigación del subsuelo. Para sondeos y tomografías.

Preparación del área de trabajo: Se debe demarcar el área con cinta y conos o colombinas de tránsito y retirar todo material, elementos o estructuras que obstaculicen el posicionamiento de los equipos para el desarrollo de las actividades de estudio cuando se requiera y de acuerdo a las condiciones al sitio. Además, se debe geo-referenciar cada sitio de investigación geofísica.

Equipos: Esta actividad se desarrollará con la ayuda de un Equipo de resistividad SUPERSTING R8 IP (Figura 10), es un equipo multi-canal portátil, medidor de resistividad del subsuelo con almacenamiento de lecturas en memoria con ciclos de medidas definidos por el usuario. Proporciona la exactitud más alta y los niveles más bajos de ruido en la industria.



Figura 10. Equipo SuperSting R8 IP para realizar Tomografías Eléctricas 2-D, 3D Y 4D

Uno de los nuevos métodos desarrollos en años recientes es el uso de la Tomografía Eléctrica 2D o 3D (Electrical Tomography) o también llamada Imágenes Eléctricas (Electrical Imaging), que pueden obtener mejores resultados que otros dispositivos en áreas con geología compleja. Tales prospecciones se efectúan comúnmente usando un número grande de electrodos (56), conectado a un cable multi-conductor (Figura 11).

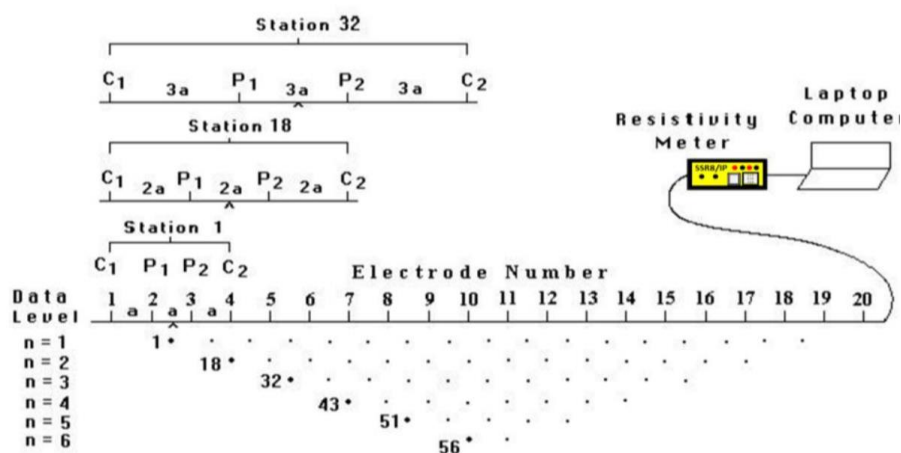


Figura 11. Dispositivo para prospecciones por Tomografías Eléctricas 2-D y secuencia de medidas. Tomado de: Kepong and Selangor, 2011

Descripción de actividades

Actividad	Responsable
1. Se confirma la realización del servicio y el tiempo estimado para la ejecución.	Director de proyectos
2. Se coordina la logística para el servicio (hotel, viáticos, etc). El Director de Proyectos o Líder de Proyectos es el encargado del presupuesto del viaje (alimentación, hotel, otros.)	Director de proyectos
3. Alistamiento de equipos para el trabajo, se deja registro en el formato Preoperacional equipo de Tomografías Eléctricas.	Auxiliares de campo
4. Realizar preoperacional del vehículo	Director de proyector
5. Se realiza el respectivo cargue de equipos y herramientas en la camioneta.	Auxiliares
6. Desplazamiento del personal al lugar de trabajo.	Director de proyector
7. Se inicia el trabajo haciendo un reconocimiento del lugar de trabajo, identificando los posibles riesgos y tomando medidas para minimizar estos riesgos. Adicionalmente se hace una inspección aérea y se deja registro fotográfico, el cual se usa para identificar posibles fallas o abismos en el área y tomar las respectivas acciones. Esta actividad no se realiza en todos los estudios, es el Director de Proyectos el que determina a criterio y experiencia su realización y también bajo las condiciones especiales del lugar.	Todos El uso del equipo aéreo es responsabilidad del Director de Proyectos.
8. Seleccionar el área para la ejecución de la Tomografía Eléctrica 2D-3D.	Director de proyectos
9. Realizar charla de 5 minutos para la identificación de riesgos y peligros en el área de trabajo y registrar en el formato establecido.	Director de proyectos
10. Medir la longitud o área en la cual será extendido el multicable en el terreno (el equipo cuenta con 56 electrodos con espaciamiento de 10 metros entre ellos).	Auxiliar de campo
11. Colocar el SuperSting R8 IP en el centro de la línea, perfil o arreglo que se quiere obtener.	Auxiliar de campo
12. Realizar las mediciones entre la disposición de los 56 electrodos y enterrarlos quedando bien firmes.	Director de proyectos
13. Extender el multicable y conectarlo a todos los electrodos.	Auxiliar de campo
14. Conectar el multicable al equipo y al Swith Box e inmediatamente realizar una revisión de resistencia o de contacto para todos los electrodos en forma automática con el SuperSting R8 IP, verificando que todos estén bien conectados.	Director de proyectos

15. Proceder a programar el equipo a la necesidad esperada (RES, PI y/o SP) y poner en funcionamiento la adquisición de datos en forma automática.	Director de proyectos
16. Mientras se toman los datos en la planilla se hace el levantamiento topográfico de la línea de tomografía, por medio de una estación o de forma manual.	Director de proyectos y Auxiliar de campo.
17. Se toman tres puntos de georeferenciación, en el centro y a cada lado de la línea, para su respectiva localización en los planos.	Director de proyectos y/o Líder de proyectos.
18. Cuando el equipo haya realizado toda la adquisición de datos se procede a apagarlo y a organizar nuevamente todo el equipo, cables y accesorios en sus estuches originales y se guardan los equipos en los vehículos de la empresa.	Director de proyectos
19. Se descargan los datos al equipo portátil utilizando el software de inversión y modelización AGI EarthImager 2D o 3D, para luego proceder a su interpretación y realización del informe.	Director de proyectos y/o Gerente General
20. Se Realiza informe final con los datos obtenidos en campo, se procede a realizar la revisión y aprobación de los informe para poder enviarlo al cliente por medio digital y físicamente cuando el cliente así lo solicite.	Director de proyectos

El estudio geofísico se realiza con un equipo de resistividad SUPERSTING R8 IP (Figura 5) con certificado de calibración. Es un equipo multi-canal portátil, medidor de resistividad del subsuelo con almacenamiento de lecturas en memoria con ciclos de medidas definidos por el usuario. Proporciona gran exactitud y los niveles de ruido son bajos. Este instrumento puede medir simultáneamente hasta 8 canales utilizando un transmisor de alto poder para que la producción de datos de campo pueda alcanzar muy altas velocidades.

Las siguientes son las especificaciones técnicas del equipo utilizado:

Corriente de salida de 1mA - 2000mA continuo, medido a gran exactitud; voltaje de salida de 800 Vp-p, el voltaje actual del electrodo depende de la corriente transmitida y la resistividad del subsuelo; la supresión de ruido será mejor que 100 dB en Hz $f > 20$ Hz; la supresión de ruido de líneas eléctricas será mejor que 120 dB en las frecuencias de líneas eléctricas (16 2/3, 20, 50 &

60 Hz) ciclos de medida 1.2 s y más; la impedancia de entrada es >20 MOhms; la total exactitud es mejor que 1% de lectura en la mayoría de los casos (medidas de laboratorio).

La certeza de la medida del campo depende del ruido del terreno y de la resistividad. El instrumento calculará y mostrará estimación exacta de las medidas; el SuperSting R8 IP está diseñado para hacer disposiciones dipolo-dipolo, polo-dipolo, polo-polo, Wenner y Schlumberger incluidos estudios completamente automáticos de roll-along con el sistema modo-doble swift automático de multi-electrodo (patente 6.404.203). El SuperSting R8 IP puede hacer cualquier otra disposición utilizando un archivo de comandos programado por el usuario; el superSting cuenta con un monitor gráfico de LCD (16 líneas x 30 caracteres) con luz nocturna; la temperatura de operación está entre -5 a $+50^{\circ}\text{C}$; 56 electrodos en acero inoxidable de alta conductividad; lecturas en auto-rango; fuente de entrada 12V y 24V.

4.2. Descripción de la metodología:

Esta metodología prospectiva técnica permite la determinación de los cambios litológicos lateralmente y en profundidad, aprovechando el contraste de la resistividad entre las diferentes formaciones litológicas en la celda 1 del relleno sanitario El Carrasco.

Este método se basa en que toda roca, como conductor de la corriente eléctrica, se le puede considerar como un agregado que consta de un esqueleto sólido mineral, de líquidos y de gases.

En la resistividad de tal agregado influyen los siguientes factores:

- Resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca.
- Resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca.
- Humedad de la roca.

- Porosidad, textura y forma y distribución de los poros incide de forma directa en la resistividad de la roca, a todo este conjunto se le denomina factor de formación, de aquí que:

$p = F \cdot p_w$, donde:

- p , es la resistividad del conjunto.
- F , es el factor de formación
- p_w , es la resistividad del fluido que contienen los poros.
- Los procesos físico-químicos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto mineral.

Esta serie de aspectos teóricos expuestos son los que dan la pauta de comportamiento del parámetro resistividad para los diferentes materiales.

Técnica de campo y procedimiento de medidas:

Uno de los nuevos métodos desarrollados en años recientes es el uso de la Tomografía Eléctrica 2D (Electrical Tomography) o también llamada Imágenes Eléctricas (Electrical Imaging), que pueden obtener mejores resultados que otros dispositivos en áreas con geología moderadamente compleja (Griffiths y Barker 1993). Tales prospecciones se efectúan comúnmente usando un número grande de electrodos, conectado a un cable multi-conductor. A continuación, se muestra el registro fotográfico del extendido e instalación de electrodos para cada una de las tomografías (Figuras 12-14) y el Centro de adquisición para la toma de datos (Figura 15):



Figura 12. Extendido e instalación de electrodos y multicable para la Tomografía Eléctrica 2D

T1



Figura 13. Extendido e instalación de electrodos y multicable para la Tomografía Eléctrica 2D

T2



Figura 14. Extendido e instalación de electrodos y multicable para la Tomografía Eléctrica 2D

T3



Figura 15. Centro de adquisición de datos para las Tomografías Eléctricas

5. Resultados y Discusión

En el presente análisis se establecieron tres componentes principales para determinar la posible existencia de lixiviados en el costado occidental del relleno sanitario El Carrasco de la ciudad de Bucaramanga. Como primera medida se caracterizaron las unidades geológicas superficiales sobre las cuales se emplaza el relleno sanitario y particularmente la celda 1 del mismo; posteriormente se efectuó la caracterización geotécnica con la información suministrada por la EMAB Empresa de Aseo de Bucaramanga S.A. E.S.P para conocer las propiedades geotécnicas de cada uno de los estratos presentes en el área de estudio. El ultimo componente hace parte de la ejecución de tres ensayos Geo-eléctricos mediante la prospección por Tomografías Eléctricas 2D en el costado occidental del relleno sanitario.

Para el componente geológico se caracterizaron y se cartografiaron las unidades geológicas superficiales a escala detallada (1:2000), de acuerdo a las características físico-mecánicas de los diferentes suelos y materiales rocosos presentes en el área de estudio.

Como método de trabajo para caracterizar y conocer los diferentes estratos presentes en la celda 1 del relleno sanitario El Carrasco se estimó una aproximación semi –empírica, direccionando de esta forma la exploración de campo y ensayos de laboratorio a criterios dados por el ingeniero geotecnista y de igual forma por las especificaciones de exploración basadas en las normas de construcción vigentes (NSR-10 – CDMB 2009).

La investigación llevada a cabo consistió en la realización de tres (3) perfiles T1, T2 y T3 con interés litológico, hídrico y estructural con un análisis geológico local y su respectiva caracterización geotécnica en la celda 1 del relleno sanitario El Carrasco. El estudio geoelectrico se ejecutó con un dispositivo de medida denominado Dipole-Gradient con 56 electrodos de acero inoxidable de alta conductividad, con separación entre electrodos de 6.00 (T1), 7.00 (T2) y 6.00 m (T3), lo cual permitió investigar con gran detalle hasta una profundidad entorno de los 100 a 125 m.

A continuación, se detallan cada uno de los componentes descritos anteriormente y de igual manera se muestran las medidas para abatir los depósitos de lixiviados de acuerdo con los resultados:

5.1 Unidades geológicas superficiales (UGS)

Las Unidades Geológicas Superficiales corresponden a un conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno hasta profundidades del orden de decenas de metros (Hermelin, 1987).

Estas formaciones superficiales incluyen rocas con diferente grado de meteorización, suelos y depósitos no consolidados según su origen (Tabla), son correlacionables con procesos

morfodinámicos, debido a la acción de agentes exógenos y endógenos que modelan la superficie terrestre.

La caracterización geológica de estas unidades permite evaluar el comportamiento mecánico de un terreno, siendo esta evaluación el insumo principal para el desarrollo de obras civiles. A partir de esta información se elabora el mapa de Unidades Geológicas Superficiales, el cual proporciona de manera visual las condiciones físicas de estas unidades en superficie.

Tabla 1.

Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen

Origen de la UGS	Tipo de UGS
Derivadas de roca In situ	- Roca inalterada
	- Saprolito
	- Suelos Residual
Depósitos aluviales	- Aluviones recientes o de lecho de río
	- Llanuras aluviales
	- Abanicos, terrazas aluviales, depósitos torrenciales y fluviotorrenciales.
Depósitos lacustres y paludales	- Depósitos lacustres
	- Coluviones
Depósitos de ladera, de vertiente o coluviales	- Flujos (de lodo, tierra y de escombros)
	- Derrubios de pendiente
Depósitos costeros	- Deltas, Barras, Playas, etc.
	- Tefras, flujos piroclásticos, ignimbritas y flujos de lodos
Depósitos volcánicos	volcánicos
	- Lahares, cenizas y coladas de Lava

Tabla 1. *Continuación*

Origen de la UGS	Tipo de UGS
	- Dunas
Depósitos eólicos	- Loess
	- Cenizas volcánicas
Depósitos de glaciares	- Morrenas y Tillitas
	- Fluvioglaciares
	- Rellenos sanitarios o de basuras
Depósitos antrópicos	- Rellenos de excavaciones
	- Escombreras o botaderos

Fuente: Hermelin, 1985 y Salazar, 1995 en INGEOMINAS, (2007) Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el macizo de Santander

El presente estudio constituye un factor importante para la determinación de la vulnerabilidad de la nueva zona para la disposición final de residuos sólidos dentro del Carrasco, así como la construcción y el mantenimiento de obras de ingeniería que permitan mitigar, controlar y prevenir posibles afectaciones por fenómenos de remoción en masa en el relleno sanitario.

5.1.1 Unidades de Suelo. Para la clasificación de las Unidades de Suelo, se tuvo en cuenta la nomenclatura utilizada por el Instituto Geológico Colombiano anterior INGEOMINAS (2007), la cual subdivide los suelos en transportados, antrópicos y residuales, de acuerdo al origen de los materiales. En el área estudiada se reconocieron suelos transportados y antrópicos. A continuación, se describen las características de cada una de estas unidades:

Suelo gravoso del Miembro Órganos (Sft3): Corresponde a un depósito con consistencia firme a muy firme en estado seco, pero que con influencia de agua presenta procesos denudativos laminares de severidad, debido a su alta permeabilidad; llegando así a desprender

materiales de tamaños bloques y cantos (mayores a 1 metro). Su armazón es clasto-soportada, con variaciones puntuales a matriz soportado, con matriz limo-arcillosa, y de color gris claro, con tintes marrones y rojizos, altamente erodable. Presenta bloques y cantos redondeados de arenisca cuarzosa micácea de grano fino, limolitas rojas alteradas, bloques de esquistos, cantos de cuarzo, conglomerados y cuarcitas frescas de tamaños entre 2 cm hasta bloques de más de 50 cm a metro. Según los términos de grado de redondeamiento y esfericidad de las partículas de Powers 1953, en Comptón 1962, los clastos son redondeados, esféricos a alargados. Se define como bien calibrado según las imágenes de calibrado de las partículas Pettijohn, en Boggs, Jr. 1987 (Cruz y Caballero, sin fecha). Esta unidad presenta lentes de arcillas limo-arenosas con variación lateral areno gravosa, con presencia de líticos, micas y restos de materia orgánica (INGEOMINAS, 2007).

Esta unidad presenta un comportamiento consistente con alta permeabilidad y es fácilmente erodable lo cual permite la caída de bloques en épocas de lluvias, originando surcos, cárcavas y procesos generales de erosión laminar lo cual es un aspecto característico de esta zona (Figura).

El suelo arenoso del miembro órganos se presenta cerca de la celda de disposición actual con un espesor aproximado de 30 metros medido a partir de datos de topografía y se encuentra en contacto con el suelo del Miembro Finos, evidenciado por la variación topográfica.



Figura 16. Evidencia de erosión laminar en el suelo arenoso del miembro Órganos, presentado zurcos y cárcavas de más de un metro de ancho y profundidad, mientras que de largo cubre todo el talud (aprox. 30 metros).

Suelo del Miembro Finos (Sfl1): Esta unidad se subdivide composicionalmente en dos niveles (INGEOMINAS, 2007). Hacia la base presenta un nivel arcilloso, masivo, con tonalidades grises a verdes, estratificación plano paralela con variación de espesor en diferentes partes de la zona de estudio. (Figura 17).

Esta unidad presenta un color amarillo a pardo amarillento es matriz soportado lo que indica una fracción gruesa dispersa en una matriz prevalente clasificada como una matriz areno – arcillosa, por su humedad natural se clasifica como seco ya que no hay humedad visible, por lo contrario presenta estructuras de grietas de desecación las cuales indican que el material era altamente húmedo pero perdió su humedad ocasionando la contracción del material, sus clastos tienen forma prismática subredondeados con isotropía, es decir no tienen una dirección

particular y se encuentran orientados aleatoriamente. Esta unidad en algunos lugares de la zona de estudio aflora con un espesor de 3m variando en otros lugares con espesores hasta de 17 metros aproximadamente.

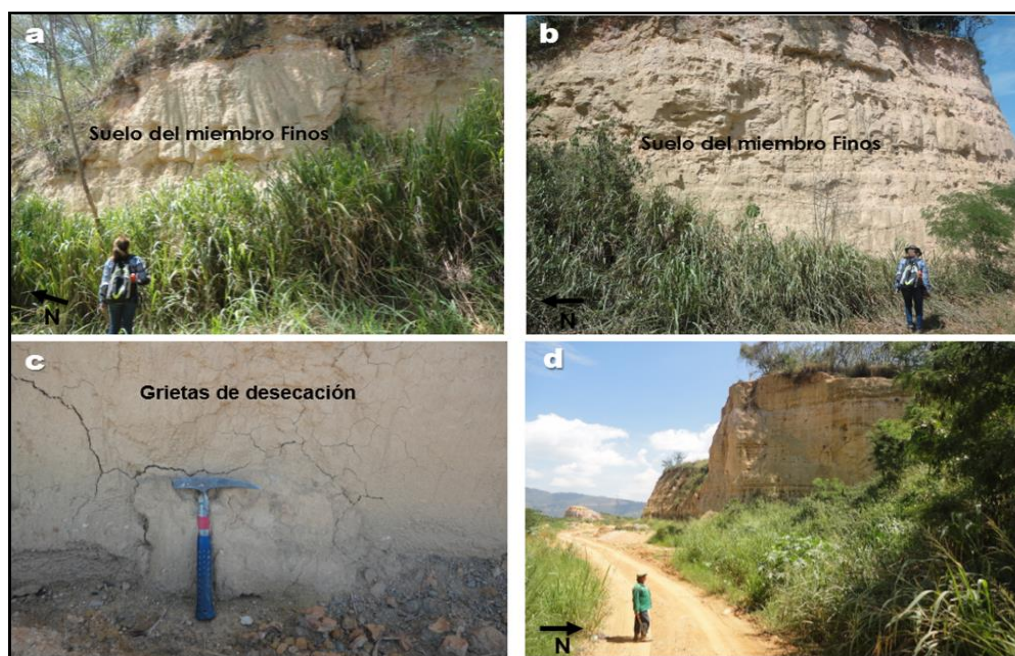


Figura 17. a) Afloramiento del suelo del miembro finos. b) suelo del miembro finos con evidencia de erosión laminar. c) Grietas de desecación en el suelo del miembro finos. d) Suelo del miembro finos.

Suelo del Miembro Gravoso (Sft2): Esta unidad está compuesta por materiales de consolidación intermedia de tonalidades amarillas a naranjas, presentando variación en su armazón de matriz soportado a clasto soportado. Estos clastos son principalmente rocas sedimentarias de las formaciones Girón y Jordán, con diámetros de hasta 5 m (INGEOMINAS, 2007).

En la zona de estudio esta unidad se presenta en contacto con el suelo del miembro finos hacia la parte NE del relleno (Figura), a lo largo del afloramiento se pueden ver procesos de erosión, se presentan clastos de tamaños variable con una matriz combinada denominada como matriz arcillosa – arenosa, los clastos presentan un grado de meteorización variable, que abarca materiales altamente meteorizados, hasta materiales inalterados.



Figura 18. Suelo del miembro gravoso en contacto con el suelo del miembro finos.

Según los términos de grado de redondeamiento y esfericidad de las partículas de Powers 1953, en Comptón 1962, los clastos son redondeados, no esféricos. Se define como moderadamente calibrado según las imágenes de calibrado de las partículas Pettijohn, en Boggs, Jr. 1987 (Cruz y Caballero, Sin fecha).

Suelo del Miembro Limos Rojos (Sfl2): Esta unidad está compuesta por arcillas y limos de color rojo con fragmentos de cuarzo. También presenta cantos redondeados con diámetros de 2-8 cm principalmente de arenisca y algunos de neis.

Geomorfológicamente este miembro constituye lo que anteriormente se denominaba como “Meseta de Bucaramanga”, donde la parte más superficial presenta un grado alto de meteorización con formación de niveles de oxidación. EL suelo del miembro limos rojos en la zona de estudio se encuentra hacia la parte Este (E) del relleno en límites con el barrio el Porvenir (Figura).



Figura 19. Suelo miembro limos rojos. Tomado de: Google Earth; 2014.

5.1.2 Clasificación de las Unidades de Suelo en El Carrasco. El resultado de la correcta identificación, caracterización y levantamiento de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio se plasma en el mapa geológico del área de estudio (Figura) y en la (Figura) se dan las estadísticas respectivas para cada unidad en porcentaje en la variable de área, de igual manera en la (Figura 22) se observa un panorama regional de la ubicación del relleno sanitario El Carrasco.

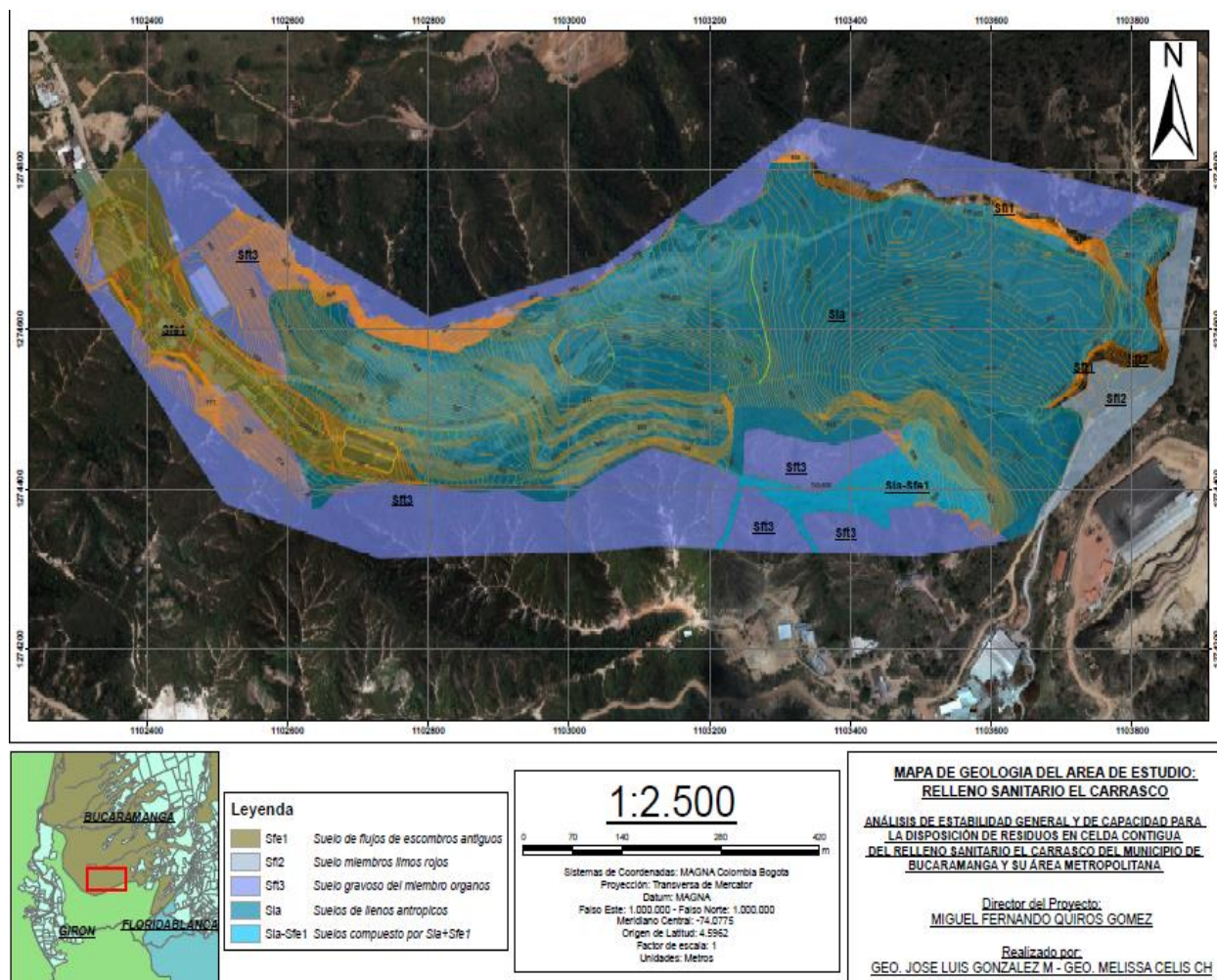


Figura 20. Mapa geológico escala 1:2500 para el área de estudio. Ver Mapa detallado

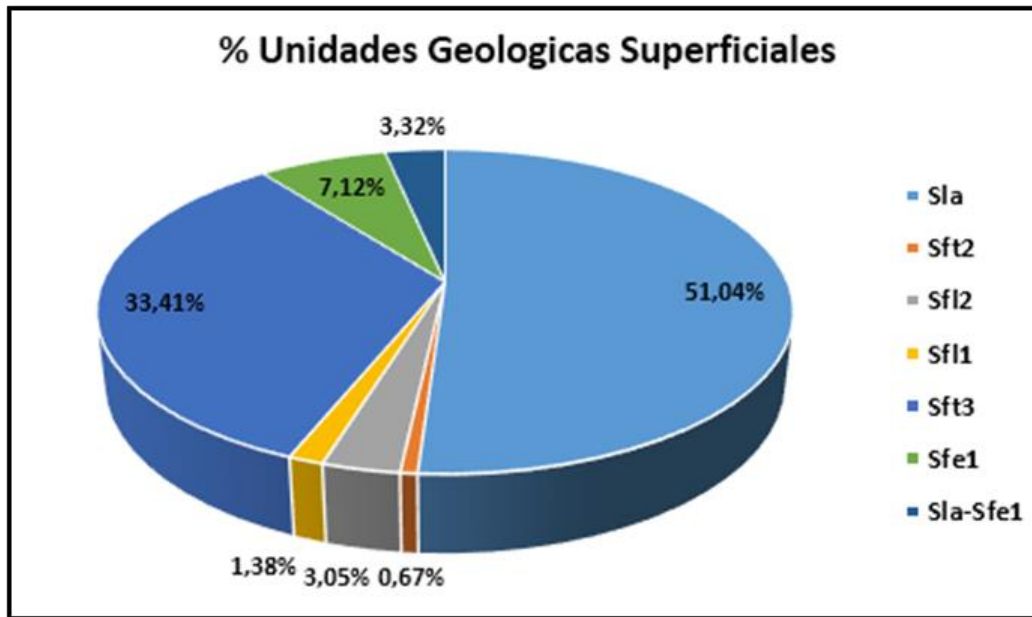


Figura 21. Porcentaje de unidades geológicas superficiales en el área de estudio. Se destaca que el 51.04% equivale a los suelos de llenos antropicos El Carrasco, el 33,41% al suelo gravoso del miembro organos, el 7% a suelos de flujos de escombros.

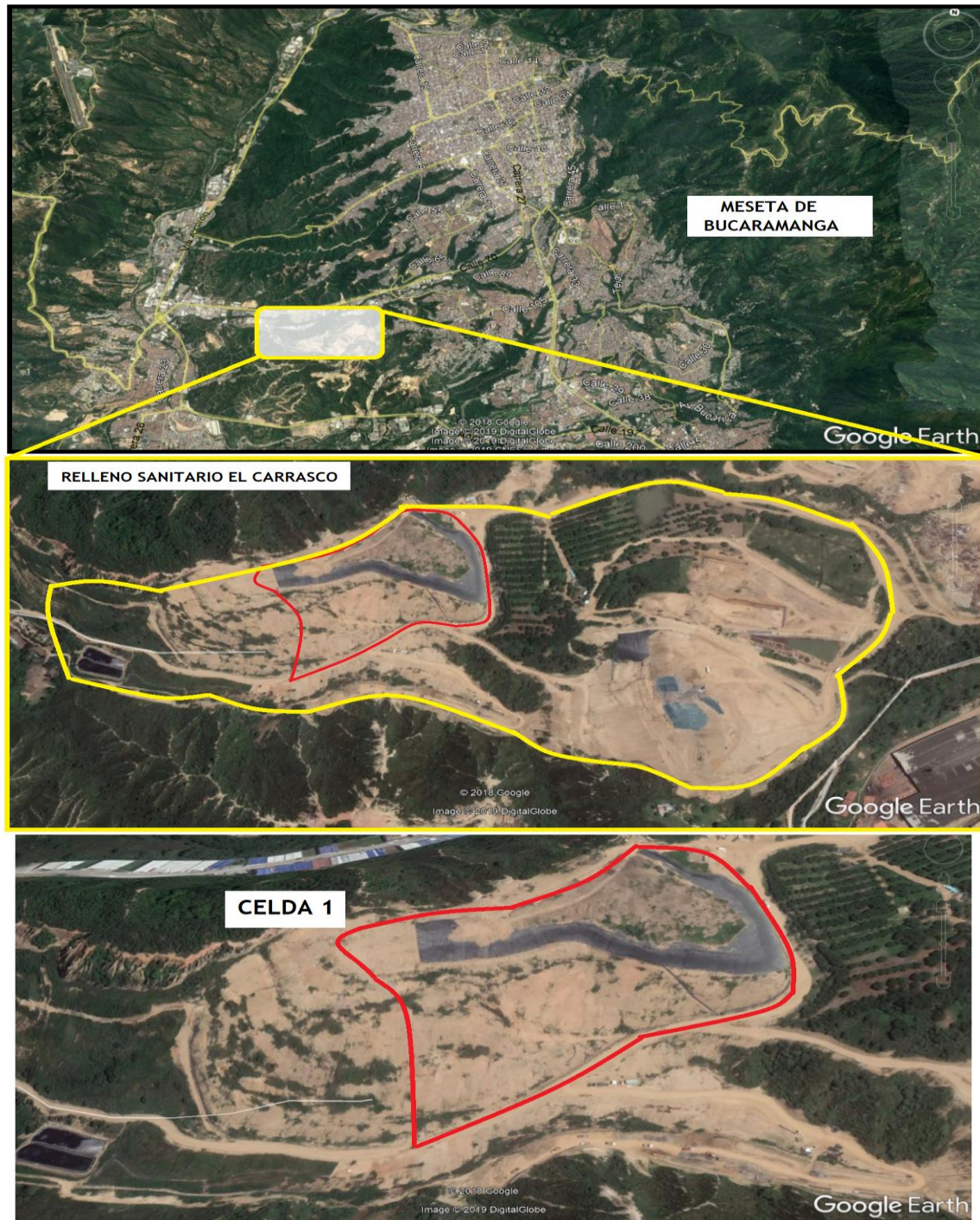


Figura 22. Imagen satelital de Google earth, ubicación sector de la Celda 1 del Relleno Sanitario El Carrasco, municipio de Bucaramanga, Santander

5.2 Caracterización geotécnica

La caracterización tiene un componente empírico y sujeto al juicio de los especialistas para establecer el tipo de parámetros a considerar en ella, los rangos de variación de estos y el método de combinación de los mismos. Los valores cuantitativos, sin embargo, serán los obtenidos de los diferentes ensayos de exploración de campo, ensayos de laboratorio y ensayos geofísicos realizados en el presente estudio.

El proceso metodológico general se ilustra en la figura 23, se componen de una sola actividad, la caracterización resulta de la investigación ejecutada en el subsuelo con base a métodos directos y geofísicos indirectos. En los cuales se presentan tres fases de investigación.

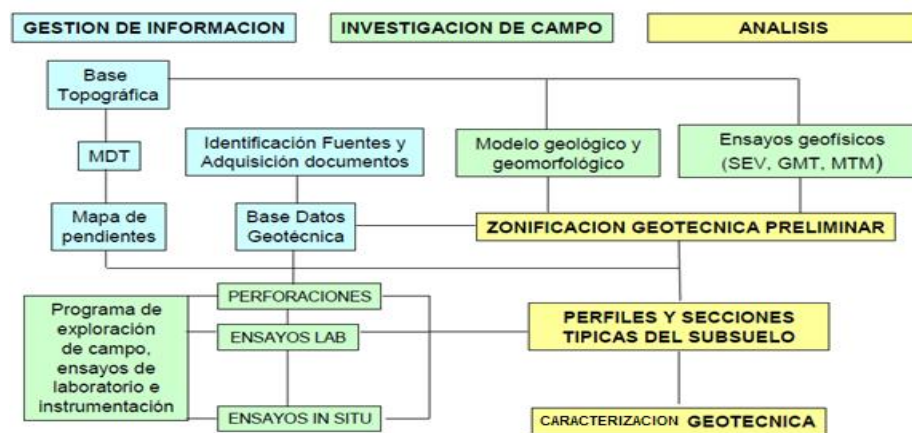


Figura 23. Metodología general para la caracterización geotécnica.

Fuente: Propia

La fase dos está orientados a la exploración de campo en la cual se detalla las características del subsuelo por medio de los ensayos geofísicos, las perforaciones y ensayos insitu como el SPT, así mismo la realización de los respectivos ensayos de laboratorio ejecutados a las muestras de la exploración mecánica.

La fase tres corresponderá al análisis de la información recolectada en las fases anteriores con el fin de determinar la zonificación geotécnica y el modelo geológico geotécnico.

5.2.1 Exploración geotécnica mecánica. Las exploraciones realizadas en el lugar de estudio fueron ejecutadas por JC Laboratorios y Geotecnia, para ello se planteó una investigación compuesta por tres sondeos (Figura 24) propuestos de la siguiente manera:

- Dos perforaciones a percusión de 10.0m de profundidad localizadas así: La primera sobre la vía de acceso en el pie de la celda dos (2) y el segundo en la cabeza del talud de la zona clausurada (Cárcava uno).
- Una perforación ha roto-percusión de 25.00 m de profundidad sobre la zona clausurada (cárcava uno)

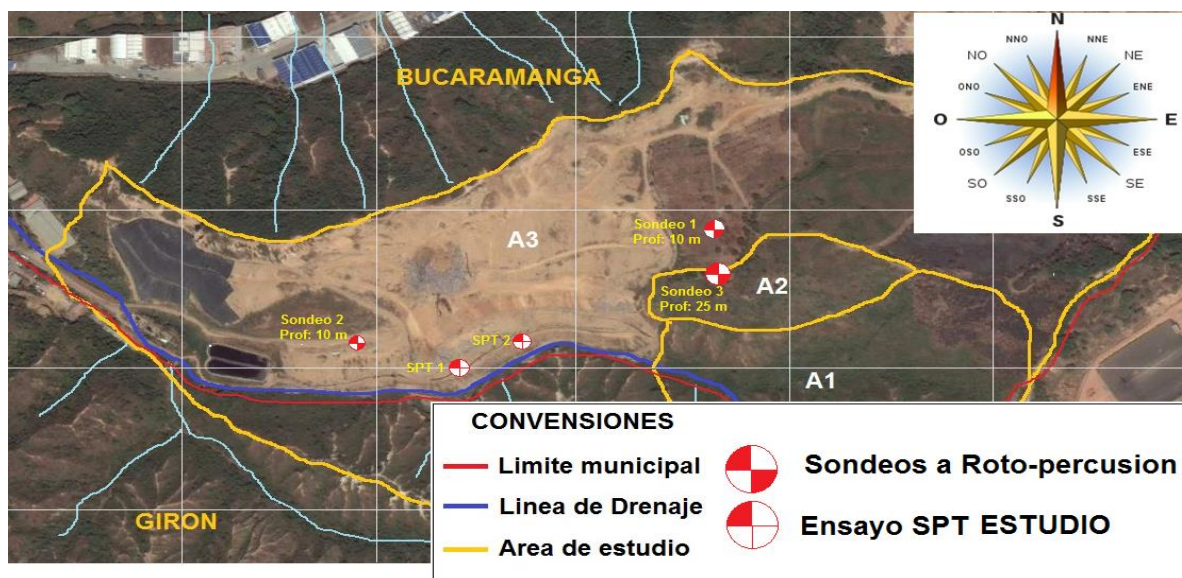


Figura 24. Localización de sondeos.

Fuente: Propia

– Adicional a esta exploración, se presentan los ensayos insitu realizados en 2014 para el análisis de estabilidad del dique que sostiene la actual celda de disposición y se realizaron treinta y cinco (35) apiques distribuidos en la mayor parte de la zona clausurada, en los límites del predio donde se observe el terreno natural y en la zona de disposición actual.

COORDENADAS			COORDENADAS			COORDENADAS			COORDENADAS		
SONDEOS	NORTE	ESTE	APIQUES	NORTE	ESTE	APIQUES	NORTE	ESTE	APIQUES	NORTE	ESTE
1	1274580	1103438	Apique 1	1274714	1103701	Apique 13	1274475	1103134	Apique 25	1274532	1103128
2	1274466	1102879	Apique 2	1274784	1103486	Apique 14	1274464	1103179	Apique 26	1274572	1103168
3	1274526	1103457	Apique 3	1274789	1103396	Apique 15	1274481	1103230	Apique 27	1274618	1103177
SPT 1	1274434	1102994	Apique 4	1274796	1103334	Apique 16	1274575	1103320	Apique 28	1274637	1103117
SPT 2	1274423	1102958	Apique 5	1274756	1103275	Apique 17	1274594	1103593	Apique 29	1274580	1103111
			Apique 6	1274630	1102885	Apique 18	1274405	1103383	Apique 30	1274530	1103044
			Apique 7	1274609	1102816	Apique 19	1274412	1103448	Apique 31	1274594	1103061
			Apique 8	1274597	1102752	Apique 20	1274410	1103573	Apique 32	1274615	1103019
			Apique 9	1274399	1102867	Apique 21	1274639	1103249	Apique 33	1274595	1102904
			Apique 10	1274401	1103006	Apique 22	1274594	1103242	Apique 34	1274571	1102889
			Apique 11	1274462	1103059	Apique 23	1274558	1103214	Apique 35	1274579	1102813
			Apique 12	1274482	1103103	Apique 24	1274517	1103179			

Figura 25. Localización de sondeos Explorativos. ¹ Adaptado de Trabajos de campo.

Para la localización de los sondeos presentados, se basó en métodos de observación, en los cuales se determinaron los lugares de exploración por factores como:

- Fácil acceso al lugar de exploración.
- Cercanía de servicio de agua para la refrigeración durante la perforación.
- Cercanía a bordes de lomos y escarpes

¹ Ensayos SPT realizado dentro del estudio Investigación geológica y geotécnica para el análisis de estabilidad del terraplén denominado el Dique ubicado en el Relleno Sanitario el Carrasco, Municipio de Bucaramanga, Departamento de Santander. 2014

- Zonas cercanas a pie de taludes.
- Lugares de intercambio de unidades geológicas superficiales.
- Zonas de disposición actual.
- Zonas de disposición clausuradas.

Los sondeos se realizaron en la zona aledaña a la celda 1 con el fin de conocer a profundidad las propiedades mecánicas de los rellenos antiguos y actuales. Como se mencionó anteriormente, las exploraciones de campo se realizaron a rotación y percusión, usando el siguiente equipo:

- Equipo de perforación marca PETTY, motor diésel Ruggerini 24 HP.
- Muestreador de pared delgada U-100.
- Barrena con broca en tricono diamantada.
- Motobomba para lodos.
- 30 metros de tubería BW-AW.
- Tubería de revestimiento NW.
- Torre de perforación (trípode).
- Pesa de 140 libras, 1 contrapesa.
- Dos diferenciales para extraer los núcleos.
- 10 metros de tubería de perforación AW,
- 3 muestreadores cuchara partida estándar (split spoon) y lazo.
- Llaves de tubo de 24 y 36”.

Durante la exploración mecánica, se recolecta una serie de muestras para practicarles ensayos de laboratorio (granulometría, límites, humedad natural y cortes directos); para el sondeo 1 y 2 se recolectaron dos muestras por cada uno, para el sondeo 3 se analizaron cinco muestras.

La realización de los 35 apiques (Figura 25) se sugirió como medio de obtención de parámetros mecánicos efectuando para ello ensayos de corte directo, esta excavación se realizó de manera manual, con excepción de cuatro apiques realizados en el centro del lugar donde se proyecta la celda 1 objeto del presente estudio, los cuales se realizaron de manera mecánica.

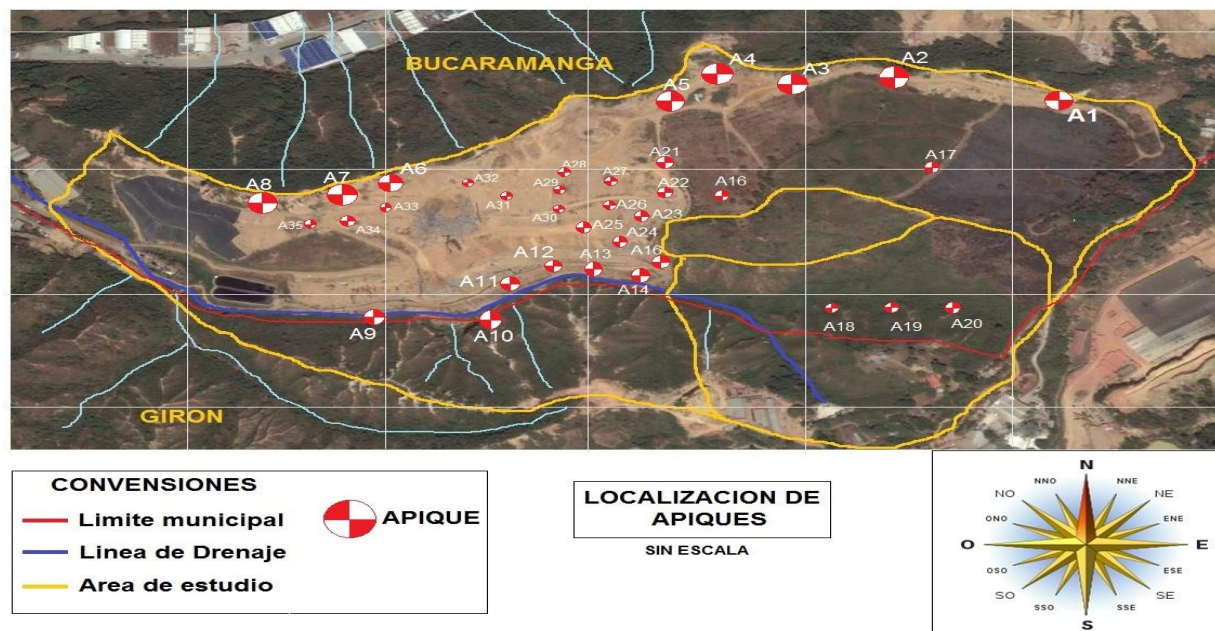


Figura 26. Localización de Apiques

Fuente: Propia

5.2.2 Ensayos de laboratorio. Las muestras obtenidas se seleccionaron las más representativas para enviar al laboratorio solicitando realizar ensayos de granulometría (Figura 26), carta de plasticidad (Figura 27), límites de consistencia y humedad natural (Figuras 28 y 29).

Tabla 2.

Ensayos de Laboratorio Realizados a las Muestras Obtenidas en Campo

Ensayo	Norma	No de ensayos
Granulometría.	NTC 77 ASTM D421 -58	44
Contenido de Humedad.	NTC 1495 ASTM D 2216	44
Límite Plástico e Índice de Plasticidad.	NTC 1493 ASTM D 4318	44
Límite Líquido.	NTC 1494 ASTM D 4318	44
Clasificación.	NTC 1504 ASTM D 2487	44
Corte Directo	INV. 154 ASTM D3080	50

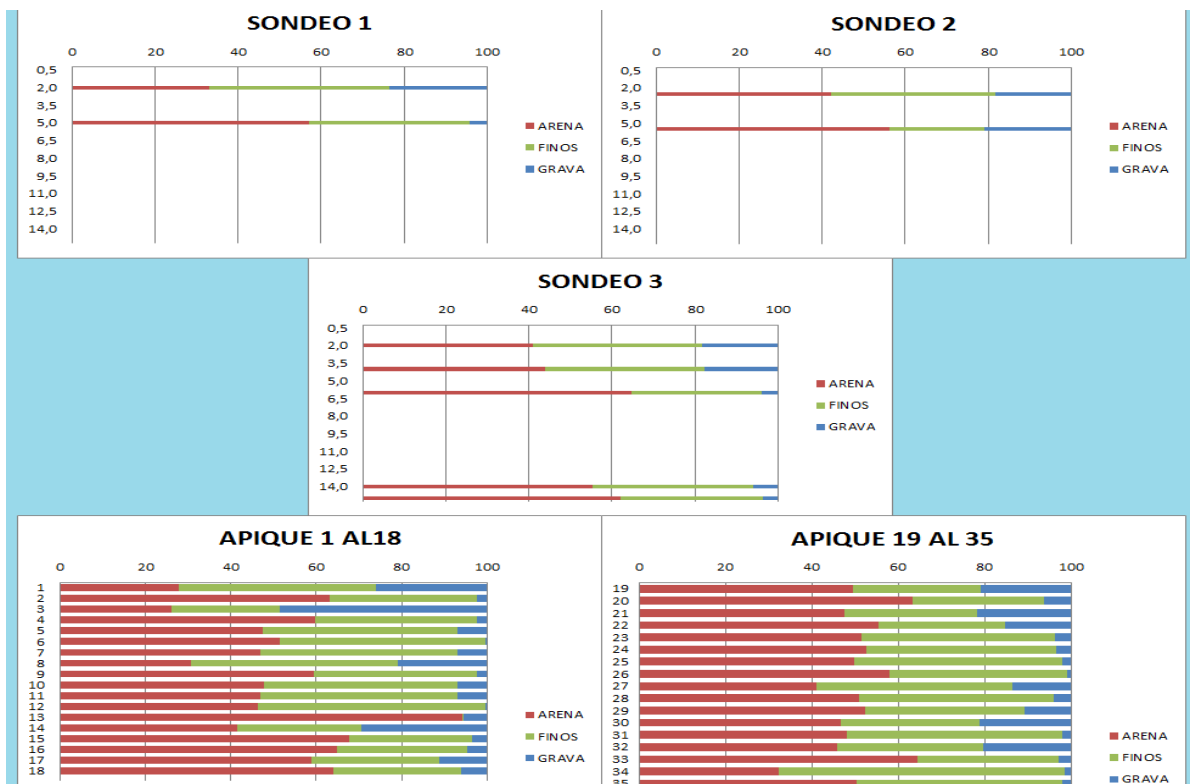


Figura 27. Resultados de granulometría

En los suelos en estudio, su composición granulométrica presenta mayor contenido de material granular tipo arena, caracterizándose por tener contenido de material gravoso de entre 42% al 49% (ver figura 28), ubicándose en mayor medida como un suelo Fino, de acuerdo a la clasificación unificada de suelo, el material encontrado corresponde a una arena arcillosa con contenido de grava, este atributo se aplica a las capas de sello que componen el proceso de disposición realizado en las celdas antiguas (zona de disposición clausuradas hace más de 2.0 años) y en la zona de disposición actual, o a material combinando entre pétreos y el relleno antrópico, pero el material intermedio correspondiente a los residuos urbanos, no entra en esta clasificación, ya que no se trata netamente de suelos, siendo poco consistente de acuerdo al número de golpes observados durante la exploración del subsuelo, lo cuales son inferiores a 10, luego los suelos clausurados o actuales de disposición se tratan de masas heterogéneas de material arenoso, arcilloso, gravoso, orgánico e inorgánico en estado de descomposición, con presencia de humedad, lo que puede causar cohesiones aparentes, además de poseer atributos bajos de densidad y fricción intermedia.

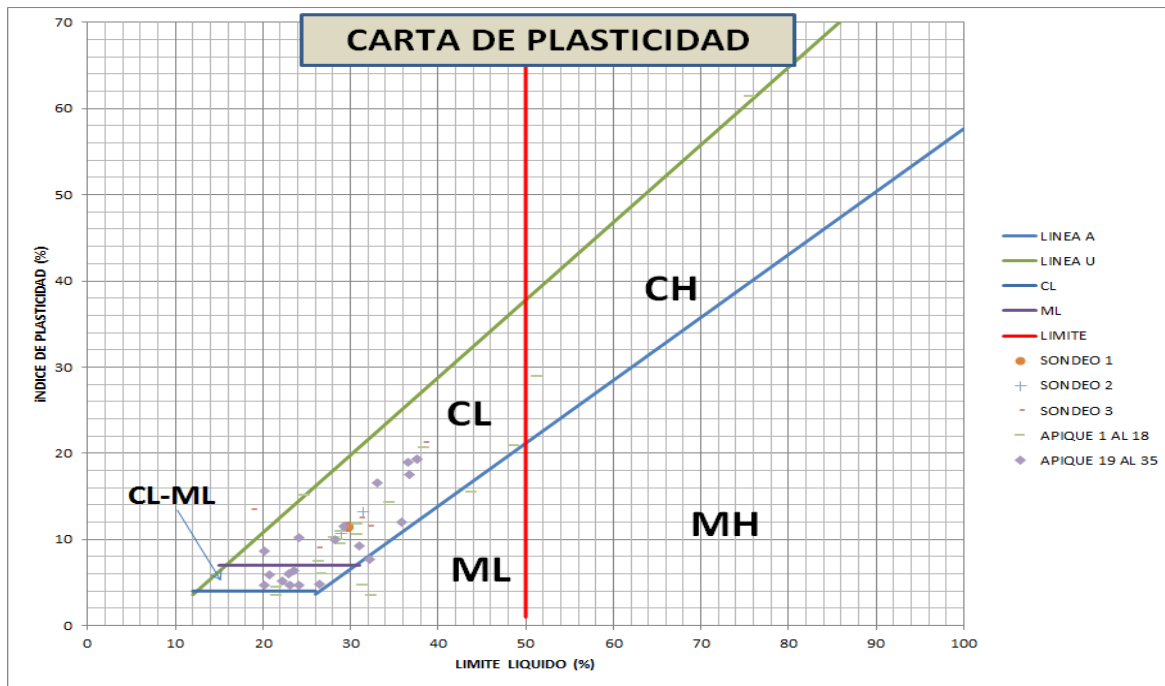


Figura 28. Carta de plasticidad.

El lugar de estudio presenta relleno que se encuentra en un estado semi sólido y que puede cambiar con la profundidad a estado plástico de acuerdo al grado de saturación y descomposición (producción y drenaje de lixiviados), además de presentar cambios volumétricos asociados a los procesos de asentamiento.

Para la fracción fina analizada dentro del ensayo de límite líquido e índice de plasticidad de las muestras recolectadas en los diferentes sondeos y apiques, se caracteriza por presentar propiedades arcillosas y arcillo - limosas (ver figura 29).

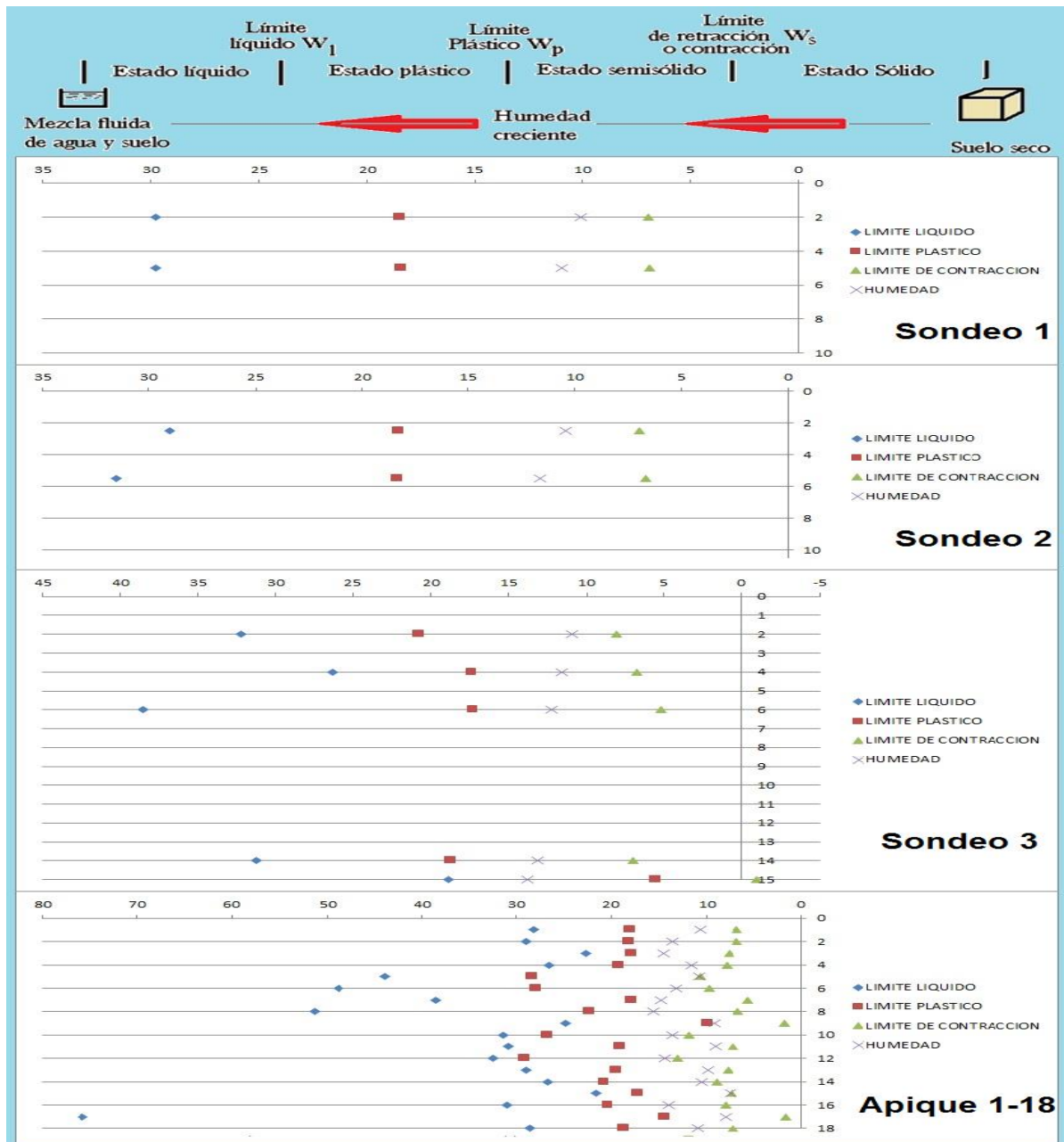


Figura 29 Estado del suelo (Limites de consistencia de los suelos).

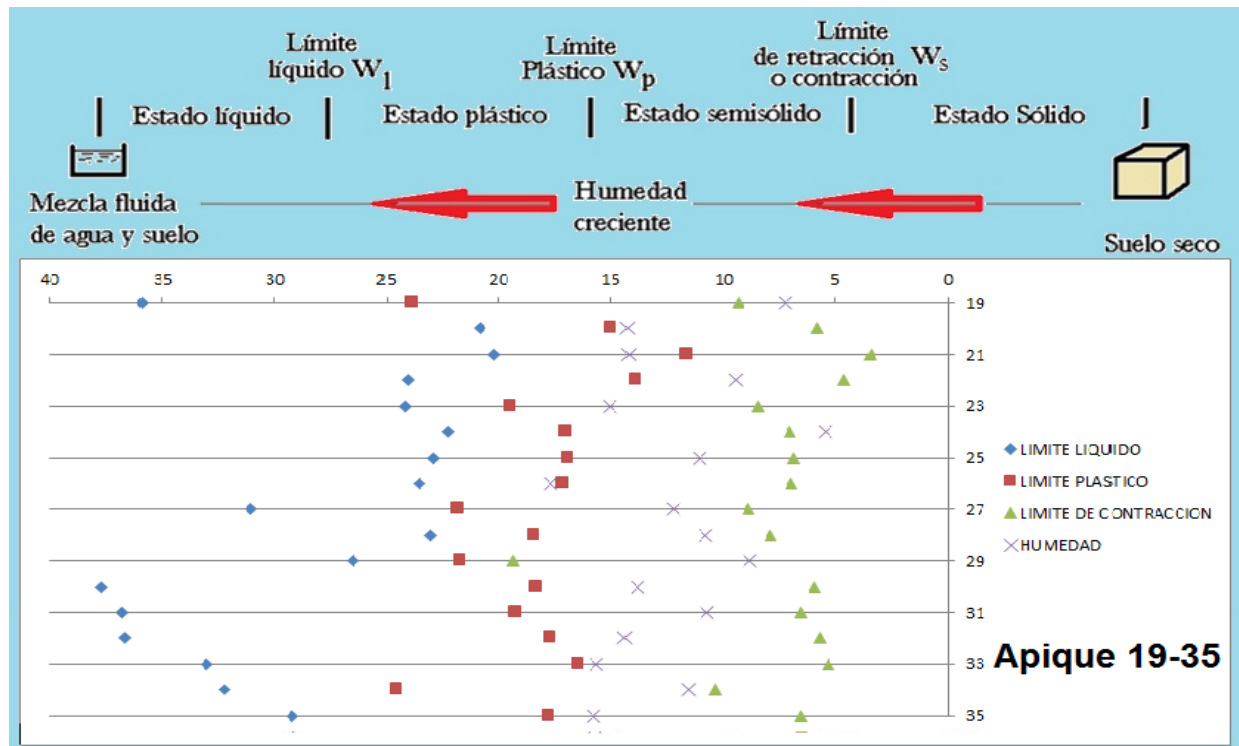


Figura 30. Estado del suelo (Límites de consistencia de los suelos).

Para los cortes directos (Figura 30), a nivel general para las muestras recolectadas, existe poca variación, al tratarse de los llenos antiguos y el actual, lo mismo sucede con los realizados dentro del terreno natural, tratan de presentar características similares.

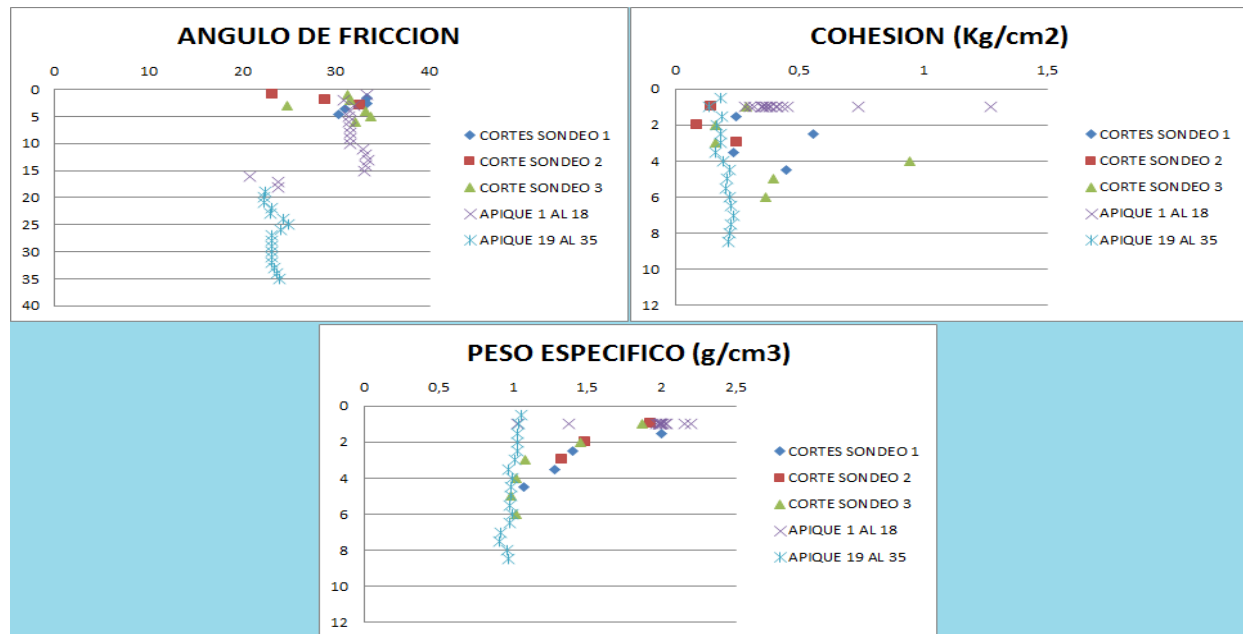


Figura 31. Resumen de corte directo.

Para el suelo propio del lugar de estudio se encontró ángulo de fricción inferior a 33° , pero no menor de 30° y cohesión inferior de $0,2 \text{ kg/cm}^2$ con pesos específicos superiores a $1,90 \text{ g/cm}^3$ mientras que, para los residuos dispuestos, en las capas de sello y en la zona de interface entre el sello y el material dispuesto, el Angulo de fricción se aproxima a 24° , la cohesión está por debajo de $0,19 \text{ kg/cm}^2$ y el peso específico se aproxima a 1 gr/cm^3 .

De acuerdo a lo anterior, el lugar de estudio se categoriza por presentar los siguientes suelos:

Suelos de la formación Bucaramanga (miembro órganos – SFT3)

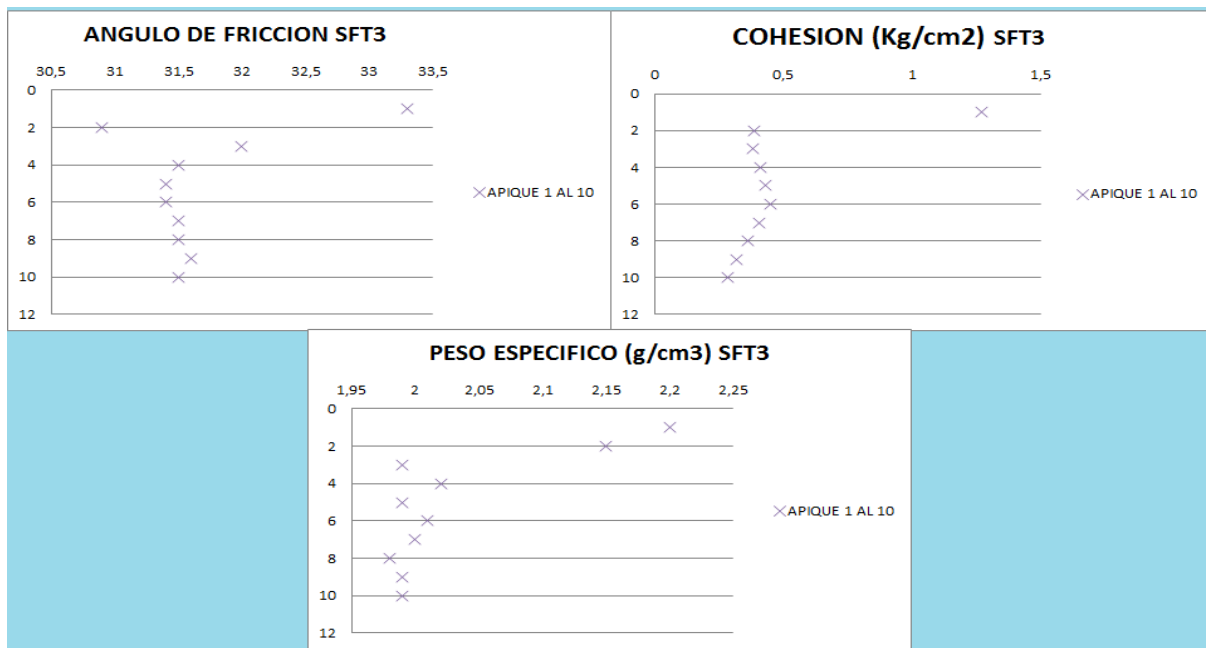


Figura 32. Resumen de corte directo, material perteneciente a el miembro Órganos – SFT3 de la formación Bucaramanga.

Estos suelos son la base donde se emplaza todo el relleno Sanitario “El Carrasco” el cual está compuesto por material un poco conglomerático debido a la forma como se dispuso, corresponde a flujo torrenciales provenientes de la parte alta del macizo de Santander, por lo que se encuentran guijos, guijarros y demás material gravoso con tamaños cuyos valores máximos no superan los 50 cm. Este material se encuentra embebido dentro de una matriz arcillo limosa y areno-arcillosa, las características geo-mecánicas encontradas dentro de los 10 cortes directos efectuados a esta formación (Figura 31), tomado los valores característicos como el promedio menos una desviación que vario entre el 1% para el peso específico hasta el 17 % para la cohesión, los valores encontrados son:

$$\phi = 30.93^\circ$$

$$C = 0.394 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = 2.012 \text{ g/cm}^3$$

Suelos de lleno antiguo (Zona de disposición clausurada o en proceso con más de dos años de cierre):

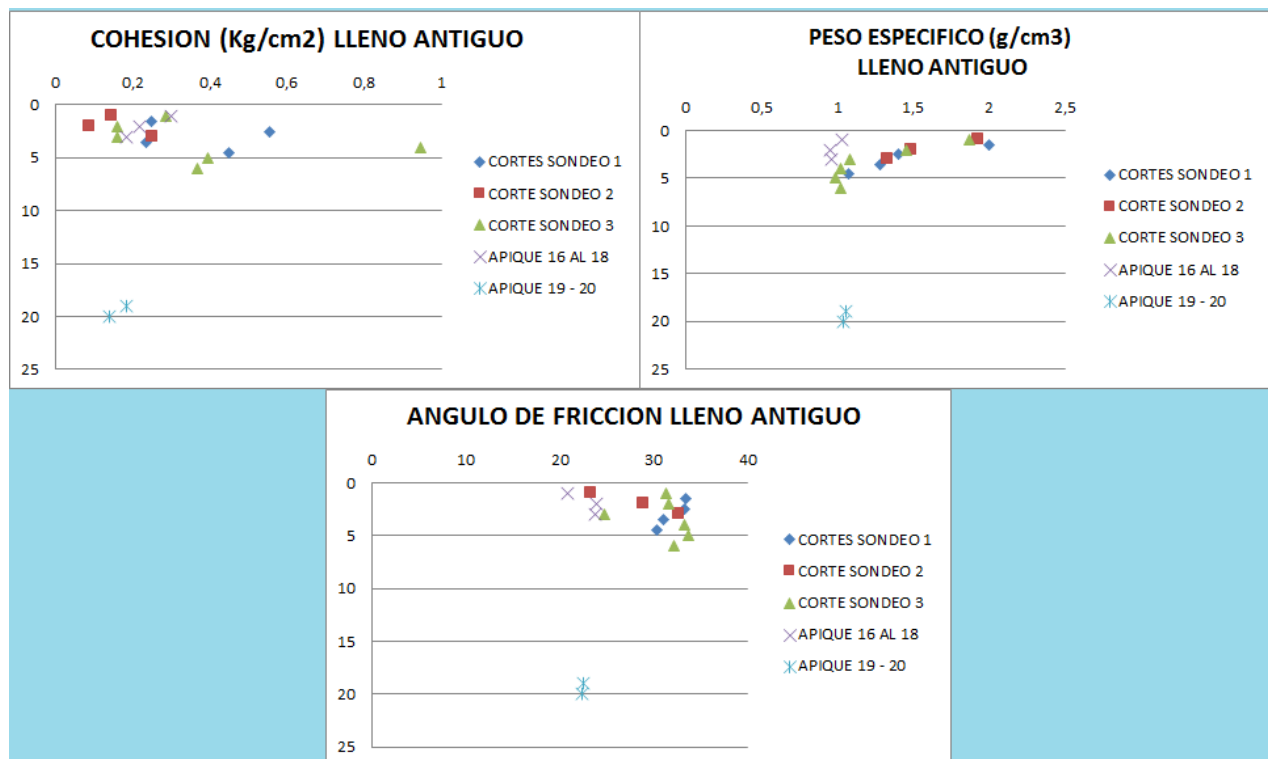


Figura 33. Resumen de corte directo, material perteneciente a llenos antiguos.

Este material es errático, el cual a profundidad presenta humedad debido a la descomposición, su coloración es verde oliva a negro, el cual consiste en una mezcla de material orgánico e inorgánico compactado (Figura 32), la cohesión se concentra en entre 0.1 kg/cm^2 a 0.3 Kg/cm^2 , con pesos específicos cercanos a 1.0 g/cm^3 con ángulo de fricción entre 20° a 30° , lo valores geo-mecánicos encontrados son:

$$\phi = 31.32^\circ$$

$$C = 0.198 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = 1.04 \text{ g/cm}^3$$

Suelo de lleno Nuevo (Actual zona de disposición):

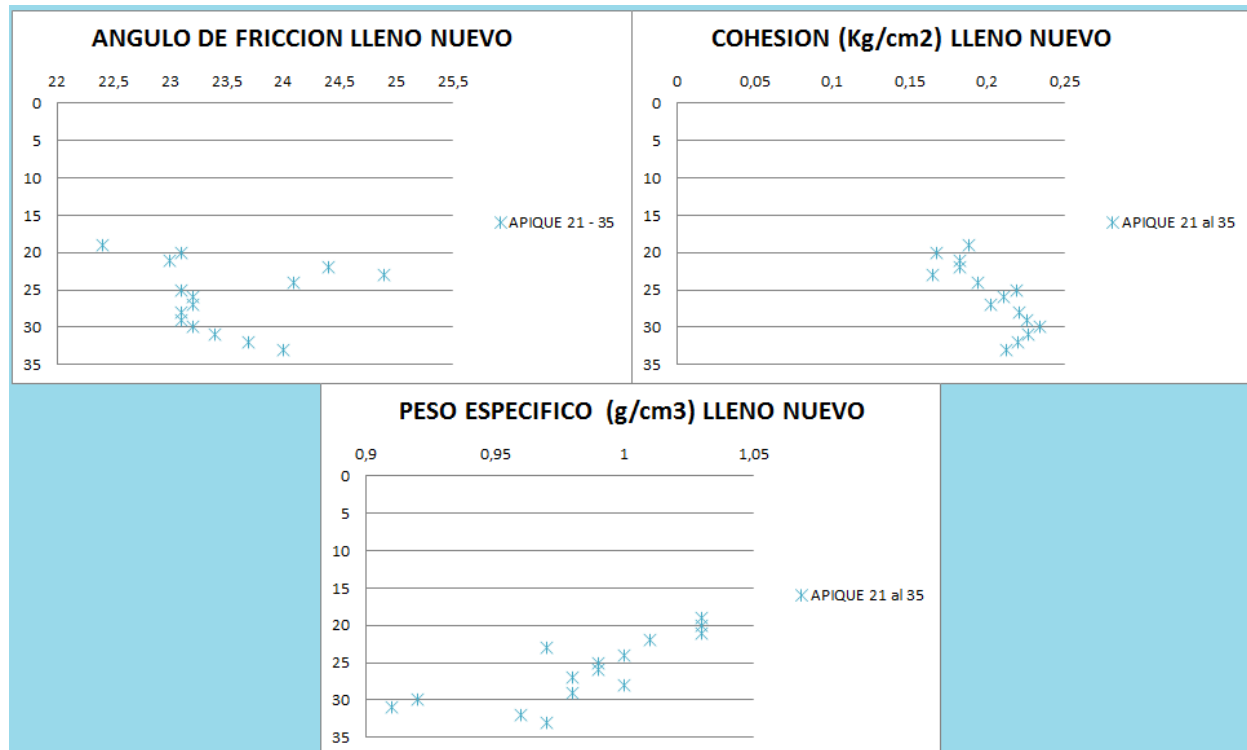


Figura 34. Resumen de corte directo, material perteneciente a llenos nuevos.

Este material es errático, el cual a profundidad presenta humedad debido a la descomposición, su coloración es verde oliva a negro, el cual consiste en una mezcla de material orgánico e inorgánico compactado con plástico (Figura 33), la cohesión se concentra en entre 0.15 kg/cm² a 0.25 Kg/cm², con un pesos especifico entre 0.95 g/cm³ a 1.00 g/cm³ con ángulo de fricción entre 23° a 35°, lo valores geo-mecánicos encontrados son:

$$\phi = 24.3^\circ$$

$$C = 0.1845 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = 0.97 \text{ g/cm}^3$$

Dónde: ϕ : Angulo de fricción – C: Cohesión – γ :Peso específico.

5.3 Prospección por Tomografías Eléctricas 2D

Para la interpretación de los datos obtenidos en campo se utilizó el software de inversión y modelización AGI EarthImager 2D (Imágenes de procesamiento e inversión), que efectúa la inversión completa 2D (y no la simple deconvolución iterativa de las pseudosecciones) de perfiles eléctricos de superficie para los diferentes dispositivos de medidas (Dipole-Gradient, dipolo-dipolo, polo-dipolo, Wenner, Schlumberger-Wenner, etc.)

El programa utiliza el método de los elementos finitos (FEM) en dos dimensiones para modelizar la respuesta eléctrica del subsuelo. No es necesario especificar ningún tipo de parámetro para la construcción de la malla, tan solo la posición y la numeración de los electrodos utilizados para las medidas de campo. El algoritmo iterativo de inversión se basa en la minimización del error cuadrático medio entre los datos de campo y los datos simulados mediante el FEM, según el método propuesto por Sasaki (1994).

El resultado es la obtención en forma de sección de la resistividad real de los diferentes materiales y su profundidad. A continuación, se muestra la localización de las tres tomografías

realizadas en el costado occidental del relleno sanitario con una imagen satelital de Google Earth (Figura 34) y una fotografía tomada con un drone phantom 3 (Figura 35).

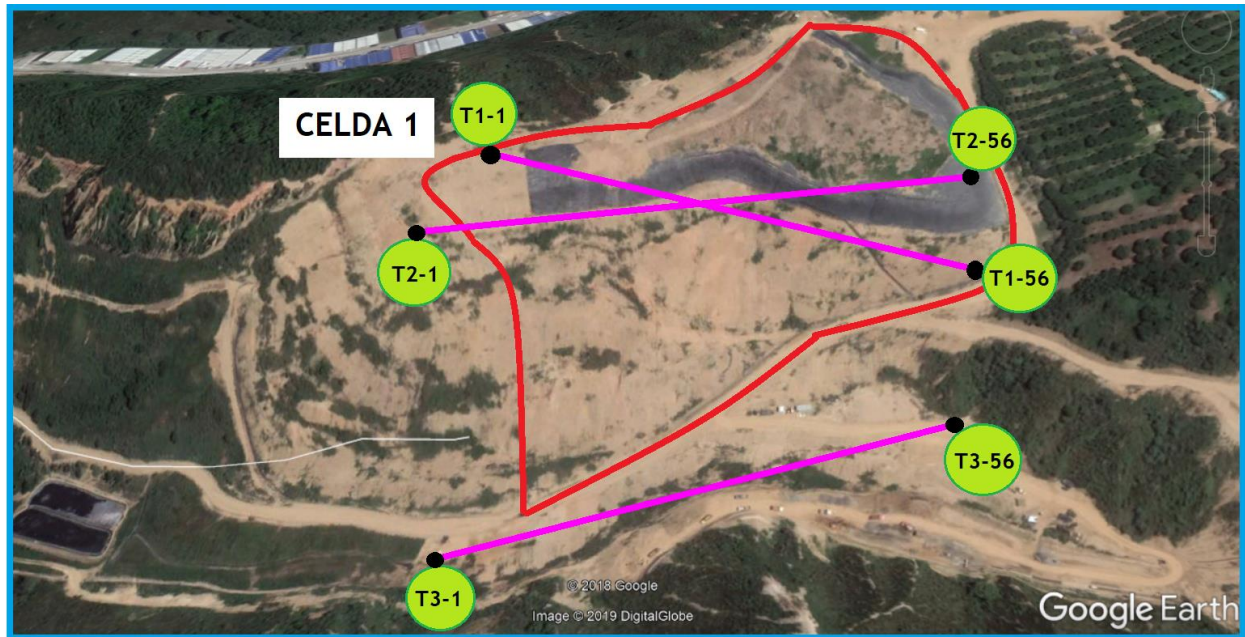


Figura 35. Imagen satelital de Google Earth con la ubicación de las Tomografías Eléctricas 2D T1, T2 y T3 en el sector de la Celda 1 del Relleno Sanitario El Carrasco, municipio de Bucaramanga, Santander



Figura 36. Imagen Drone con la ubicación de las Tomografías Eléctricas 2D T1, T2 y T3 en el sector de la Celda 1 del Relleno Sanitario El Carrasco, municipio de Bucaramanga, Santander

Los resultados de las tres tomografías eléctricas 2D ejecutadas en la celda 1 corresponden a:

5.3.1 Interpretación tomografía eléctrica 2D T1

Localización: Sector Celda 1 (Ver Figuras 34 y 35)

Rumbo tomografía: NW-SE

Coordenadas electrodo 1 tomografía: X = 1'274.616, Y = 1'102.902

Coordenadas electrodo 56 tomografía: X = 1'274.567, Y = 1'103.214

Se detecta un contraste de impedancia en los valores de resistividad, el cual corresponde a una variación composicional de la sección estudiada (Figura 36). Presenta un depósito cuaternario suprayaciendo a un basamento jurásico correlacionable con la Formación Girón.

La parte superior de la figura 37 (Zona A) corresponde a valores de resistividad entre los 3 y 100 Ω -m, con espesor variable (aproximadamente variando de 5 a 65 m), esta unidad está compuesta por capas de basura y desechos orgánicos intercaladas con niveles de arenas y arcillas compactadas. Desde la parte central y en dirección SE el relleno sanitario presenta conductividades bajas, relacionadas con posibles lixiviados.

La parte intermedia superior de la figura 37 (Zona B) corresponde a valores de resistividad entre los 10 y 30 Ω -m. El depósito está constituido probablemente con niveles polimícticos de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura, se correlaciona con el Miembro Órganos de la Fm Bucaramanga.

Hacia el sector NW de la Zona C o parte inferior de la imagen eléctrica presenta un depósito de edad Jurásica, compuesto por areniscas finas, limolitas intercaladas y arcillolitas, muy fracturadas y meteorizadas correlacionables con la Formación Girón y corresponde a valores de resistividad entre los 30 y 50 Ω -m.

En el apéndice “Valores comparativos de resistividades en diferentes materiales”, se encuentran rangos típicos de resistividades para que puedan ser comparados con los siguientes resultados:

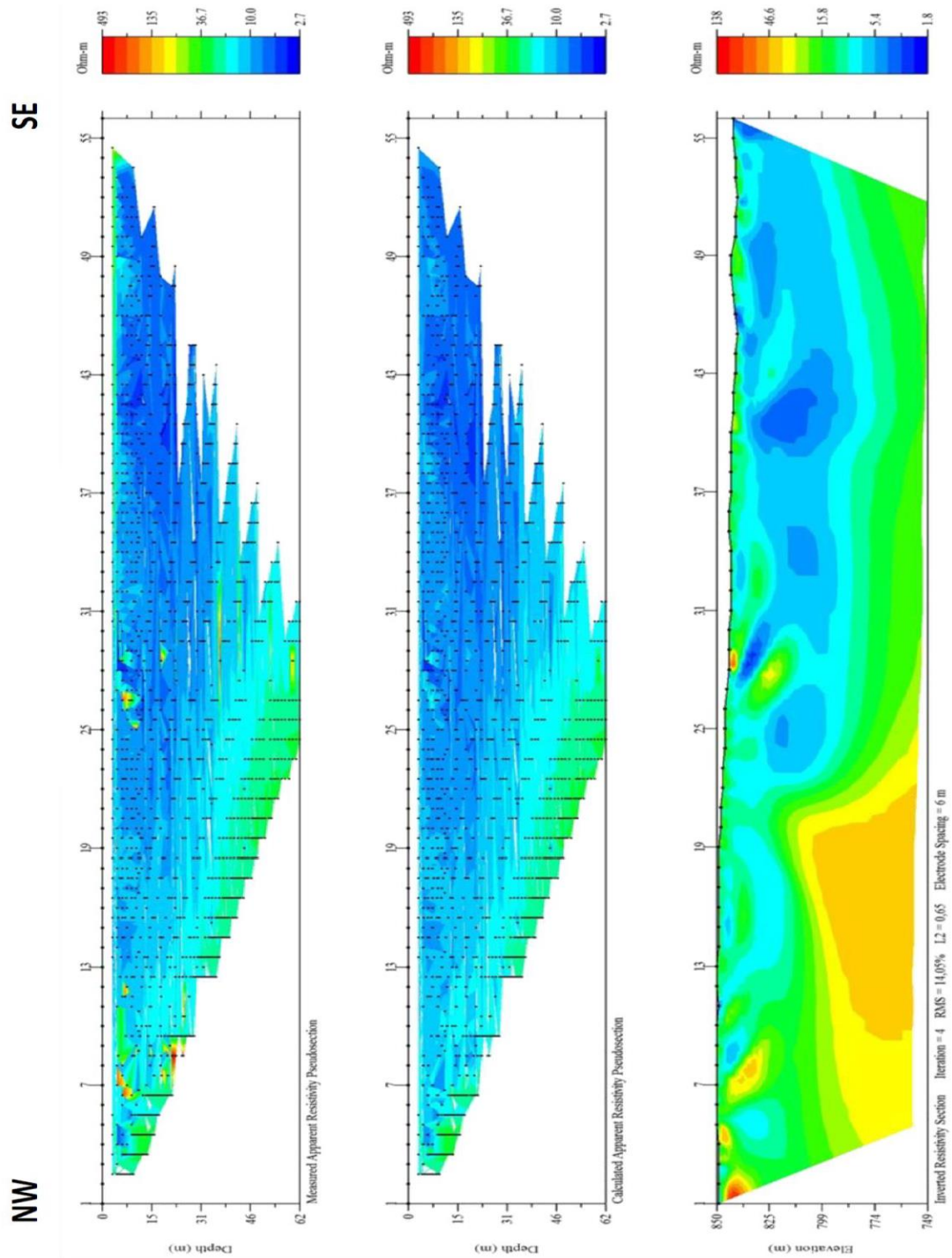


Figura 37. Imagen 2D de inversión y modelización de la Tomografía Geoelectrica T1. Adaptado de: EMAB S.A. E.S.P

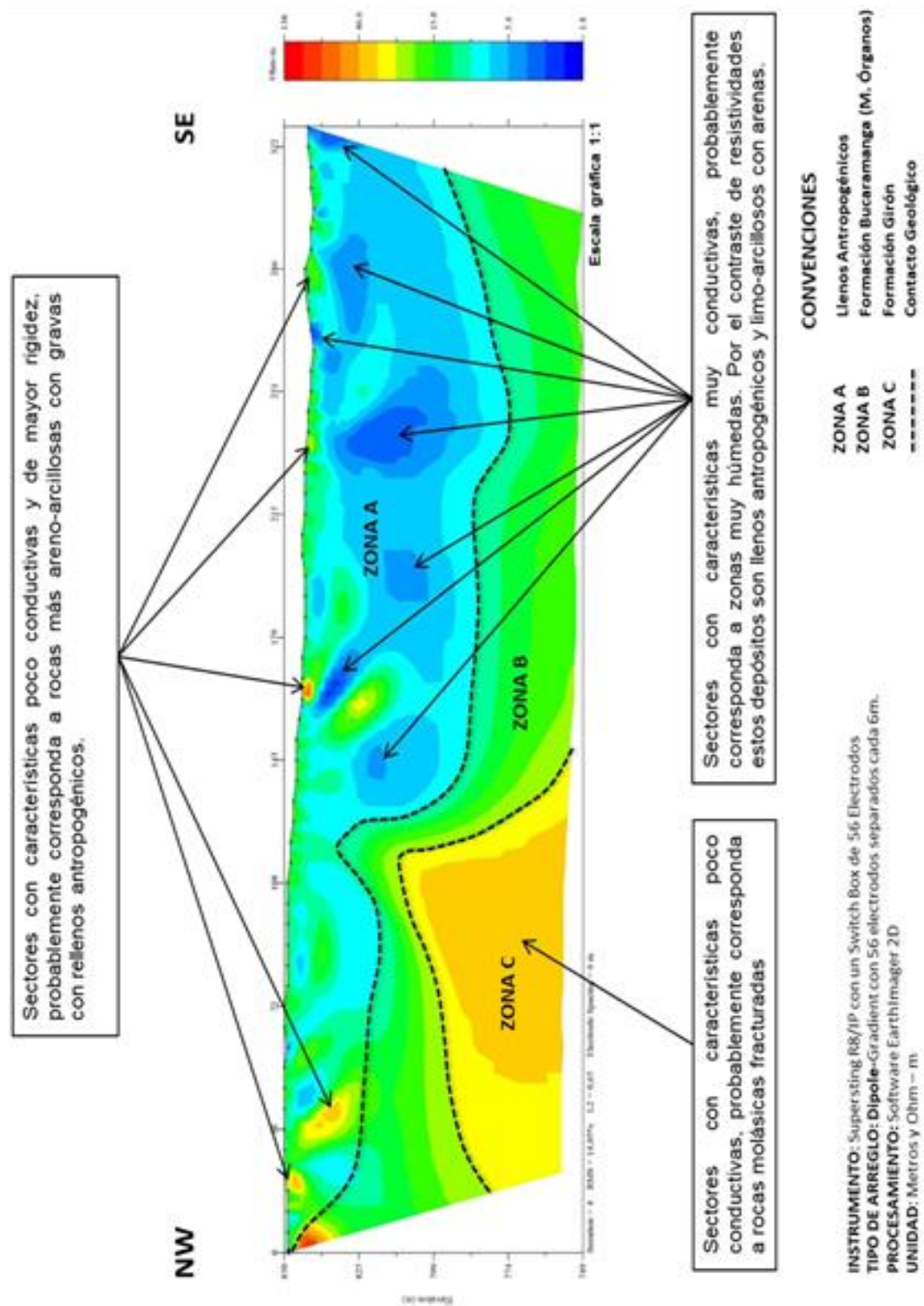


Figura 38. Imagen 2D de Tomografía Eléctrica T. Adaptado de: EMAB S.A. E.S.P

5.3.2 Interpretación tomografía eléctrica 2D T2

Localización: Sector Celda 1 (Ver Figuras 34 y 35)

Rumbo tomografía: NE-SW

Coordenadas electrodo 1 tomografía: X = 1'274.567, Y = 1'102.857

Coordenadas electrodo 56 tomografía: X = 1'274.601, Y = 1'103.231

Se detecta un contraste de impedancia en los valores de resistividad, el cual corresponde a una variación composicional de la sección estudiada (Figura 38). Presenta un depósito cuaternario suprayaciendo a un basamento jurásico correlacionable con la Formación Girón.

La parte superior de la figura 39 (Zona A) corresponde a valores de resistividad entre los 3 y 100 Ω -m, con espesor variable (aproximadamente variando de 30 a 65 m), esta unidad está compuesta por capas de basura y desechos orgánicos intercaladas con niveles de arenas y arcillas compactadas. Desde la parte central y en dirección SE el relleno sanitario presenta conductividades bajas, relacionadas con posibles lixiviados.

La parte intermedia superior de la figura 39 (Zona B) corresponde a valores de resistividad entre los 10 y 30 Ω -m. El depósito está constituido probablemente con niveles polimícticos de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura, se correlaciona con el Miembro Órganos de la Fm Bucaramanga.

Hacia el sector NW de la Zona C o parte inferior de la imagen eléctrica presenta un depósito de edad Jurásica, compuesto por areniscas finas, limolitas intercaladas y arcillolitas, muy fracturadas y meteorizadas correlacionables con la Formación Girón y corresponde a valores de resistividad entre los 30 y 100 Ω -m.

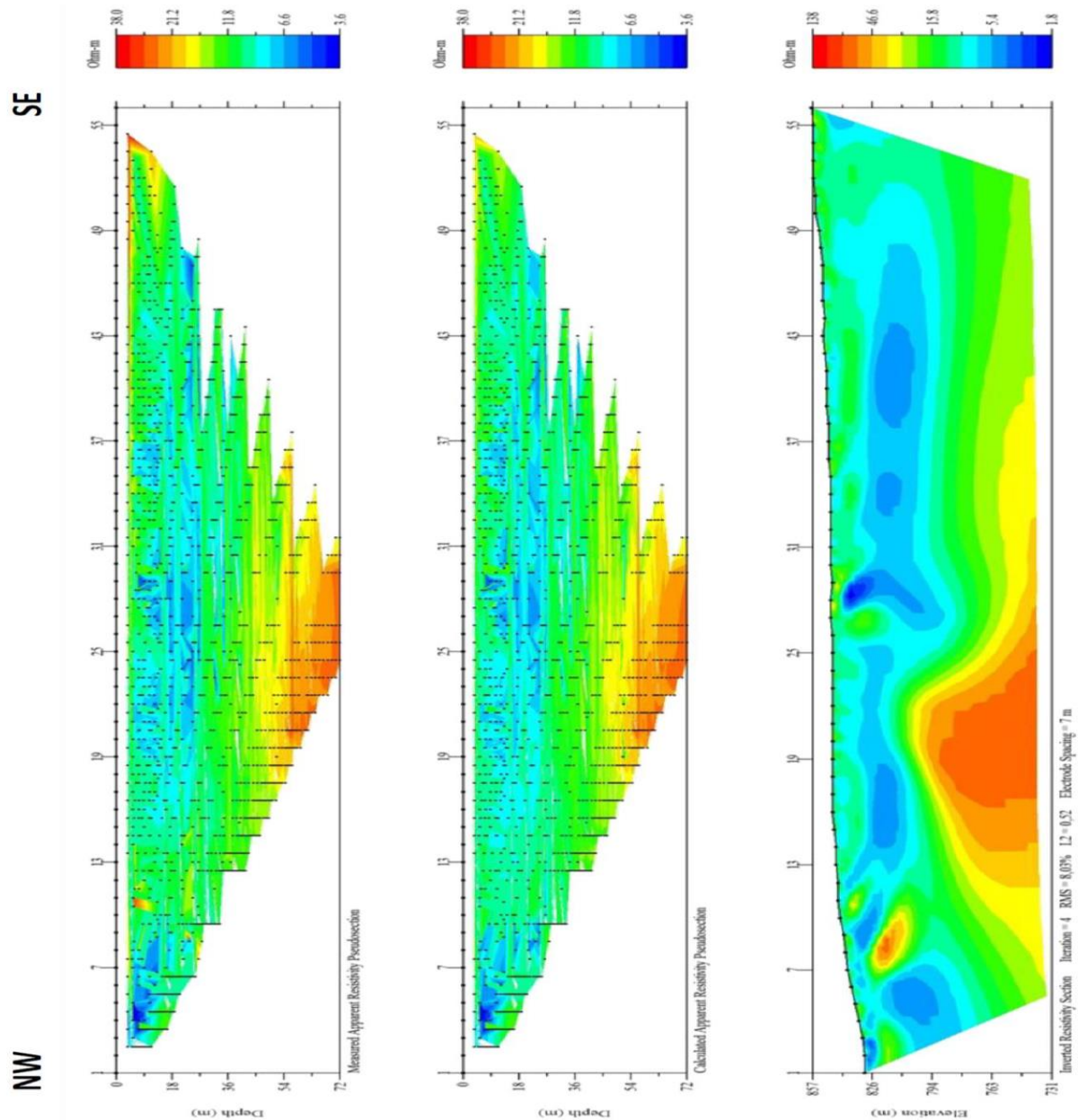


Figura 39. Imagen 2D de inversión y modelización de la Tomografía Geoeléctrica T2. Adaptado de: EMAB S.A. E.S.P

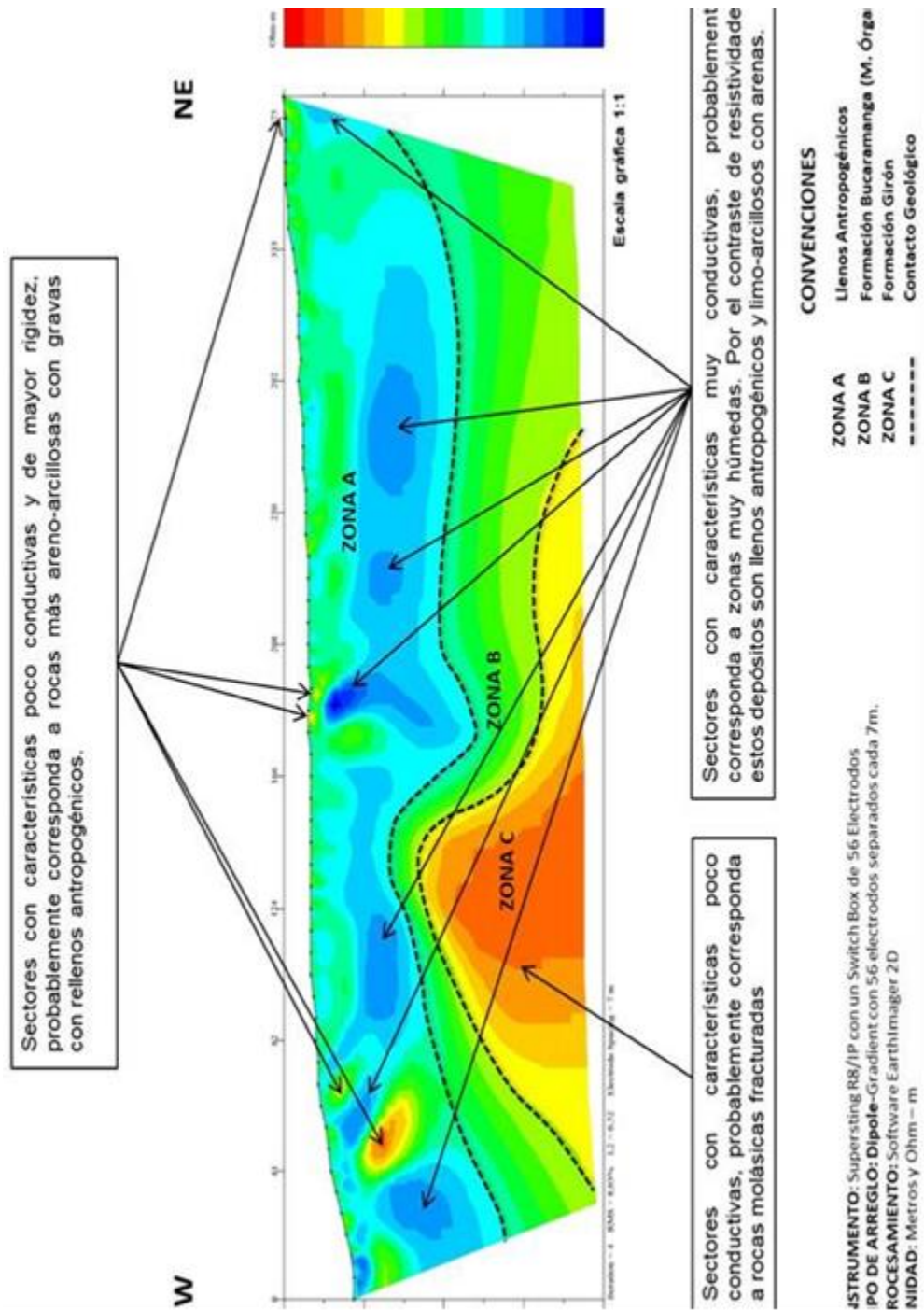


Figura 40. Imagen 2D de Tomografía Eléctrica T2. Adaptado de EMAB S.A. E.S.P

5.3.3 Interpretación tomografía eléctrica 2D T3

Localización: Sector parte baja de la Celda 1 (Ver Figuras 34 y 35)

Rumbo tomografía: SW-NE

Coordenadas electrodo 1 tomografía: X = 1'274.411, Y = 1'102.875

Coordenadas electrodo 56 tomografía: X = 1'274.493, Y = 1'103.185

Se detecta un contraste de impedancia en los valores de resistividad, el cual corresponde a una variación composicional de la sección estudiada (Figura 40). Presenta un depósito cuaternario suprayaciendo a un basamento jurásico correlacionable con la Formación Girón.

La parte superior de la figura 41 (Zona A) corresponde a valores de resistividad entre los 3 y 100 Ω -m, con espesor variable (aproximadamente variando de 30 a 60 m), esta unidad está compuesta por capas de basura y desechos orgánicos intercaladas con niveles de arenas y arcillas compactadas. Desde la parte central y en dirección SE el relleno sanitario presenta conductividades bajas, relacionadas con posibles lixiviados.

La parte intermedia superior de la figura 41 (Zona B) corresponde a valores de resistividad entre los 10 y 30 Ω -m. El depósito está constituido probablemente con niveles polimícticos de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura, se correlaciona con el Miembro Órganos de la Fm Bucaramanga.

Hacia el sector NW de la Zona C o parte inferior de la imagen eléctrica presenta un depósito de edad Jurásica, compuesto por areniscas finas, limolitas intercaladas y arcillolitas, muy fracturadas y meteorizadas correlacionables con la Formación Girón y corresponde a valores de resistividad entre los 30 y 80 Ω -m.

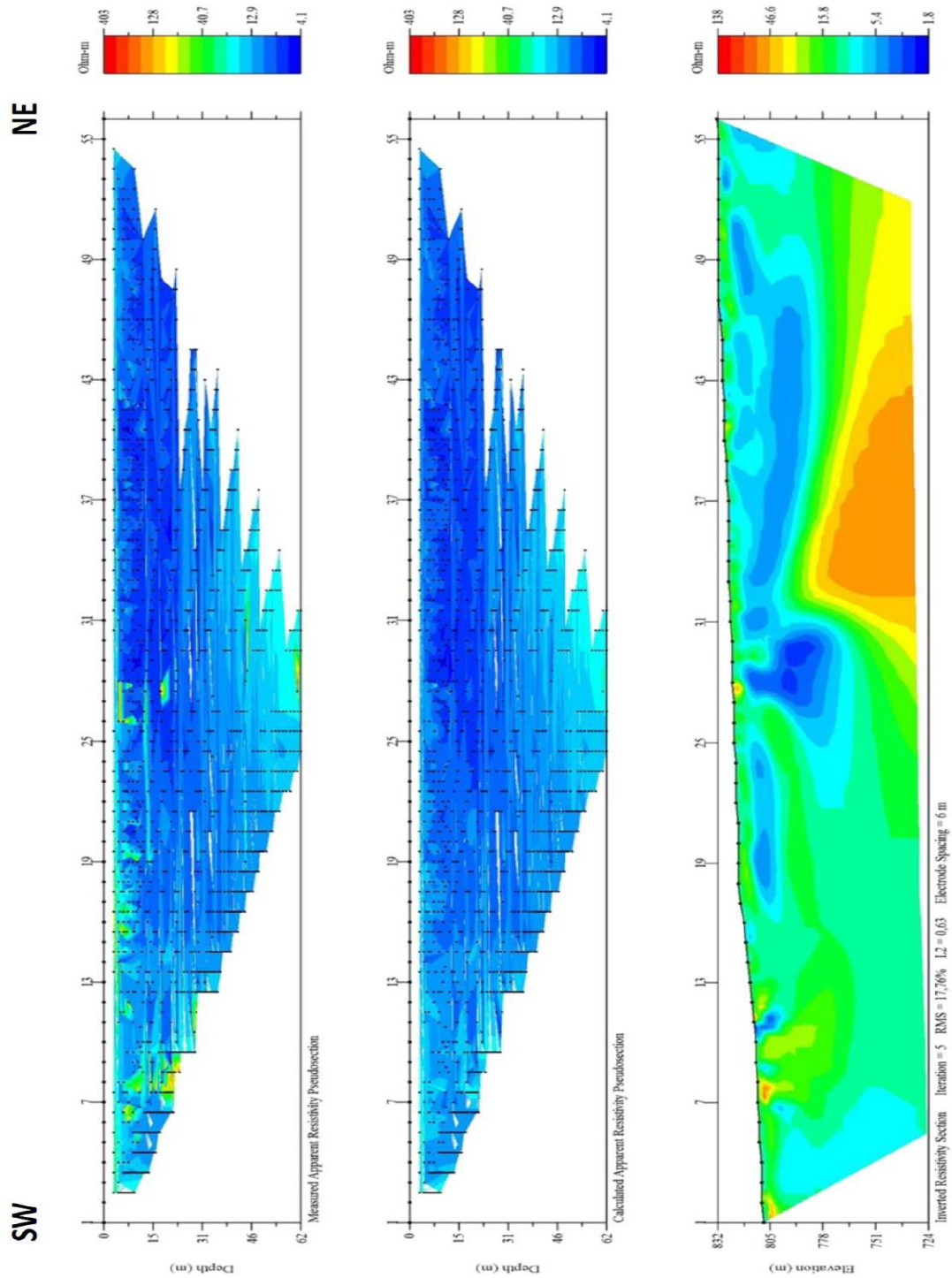


Figura 41. Imagen 2D de inversión y modelización de la Tomografía Geoelectrica T3. Adaptado de: EMAB S.A. E.S.P

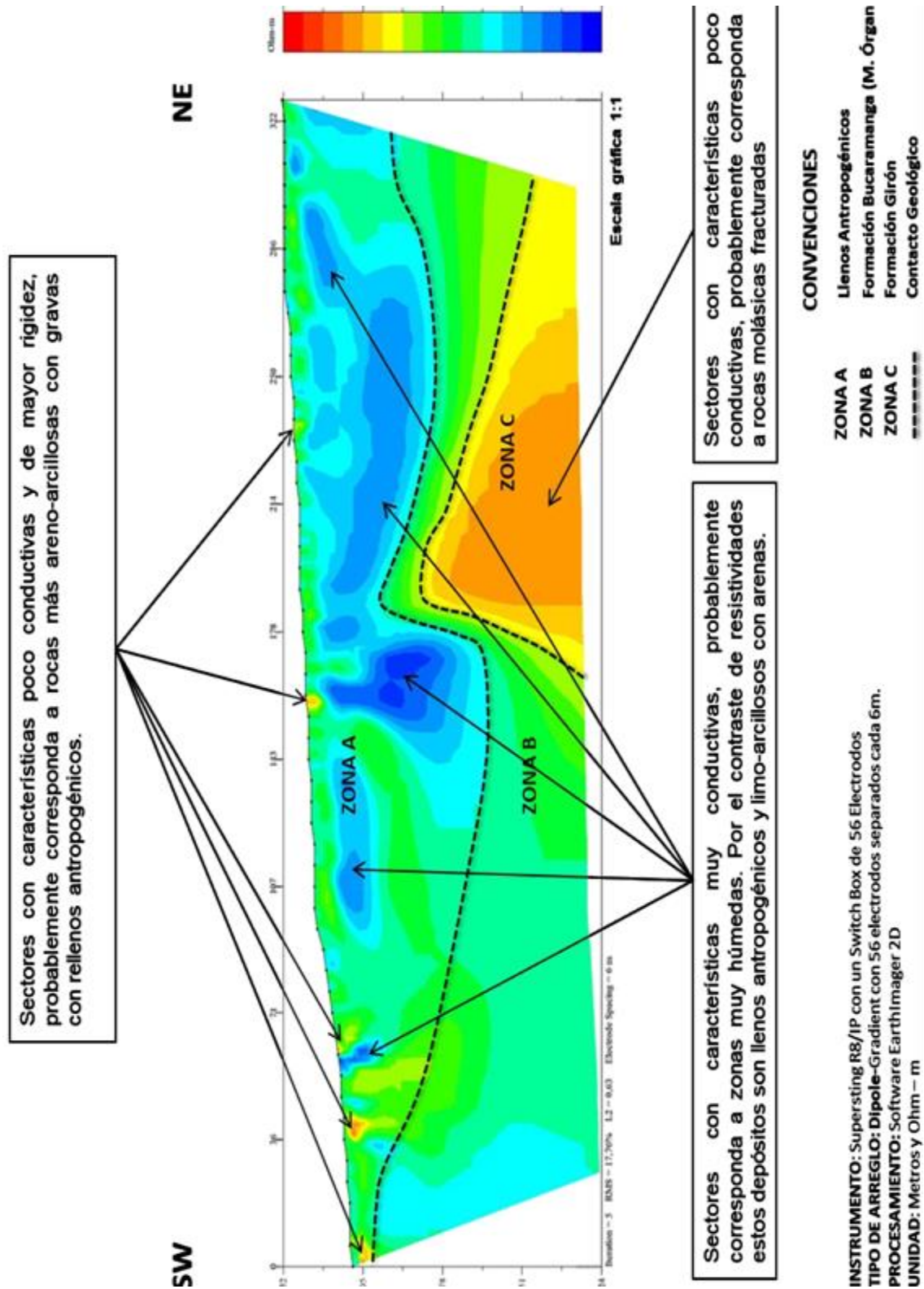


Figura 42. Imagen 2D de Tomografía Eléctrica T3. Adaptado de: EMAB S.A. E.S.P

5.3.4 Medidas para mitigar la acumulación de lixiviados en la celda 1 del Carrasco. Se identificó en las imágenes eléctricas bajo acumulamiento de lixiviados en el lleno antropogénico específicamente en el costado occidental del relleno sanitario, sin embargo, fue necesario establecer medidas para abatir estos niveles con el objetivo de garantizar la estabilidad de la Celda 1 y eliminar un posible pasivo ambiental. De acuerdo a lo anterior se ubicaron con topografía a detalle (Figura 42) sistemas de drenes de penetración horizontal y pozos de extracción forzada de lixiviados.

A continuación, se muestra la ubicación de los sistemas en la celda 1:

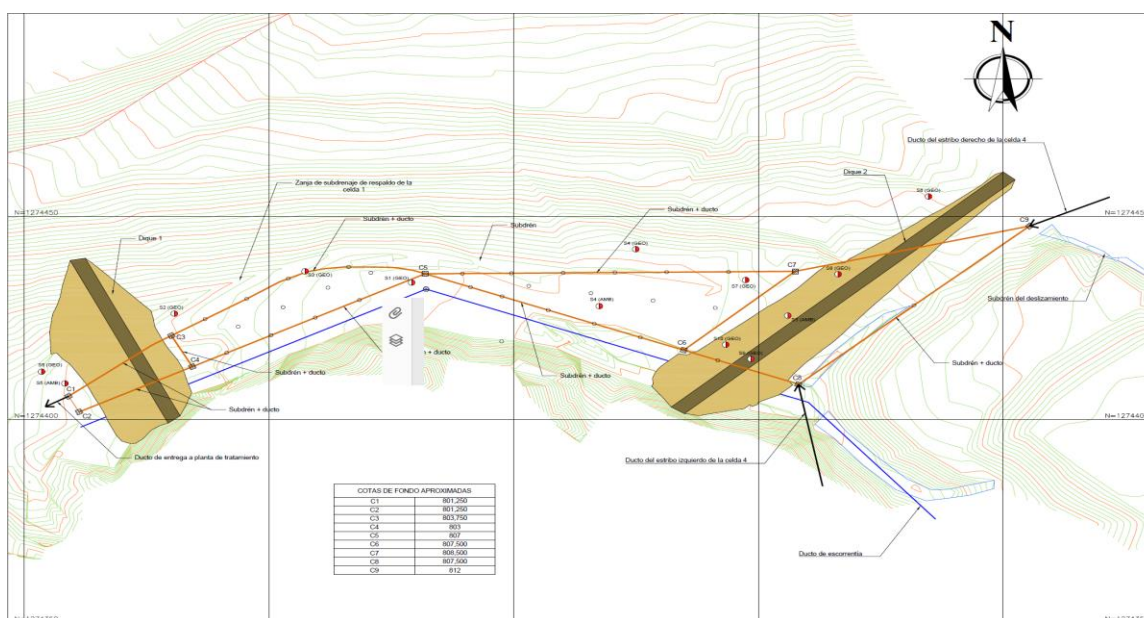


Figura 43. Localización medidas correctivas en la celda 1. Adaptado de: EMAB S.A. E.S.P

En la Figura 43 se observa la localización de cada uno de los sistemas de drenes de penetración horizontal ejecutados por el operador del relleno sanitario y en la Figura 44 se muestran dos de los sistemas instalados (La primera corresponde a uno de los pozos de extracción forzada y la segunda a un dren de penetración ubicado en la parte baja del talud)

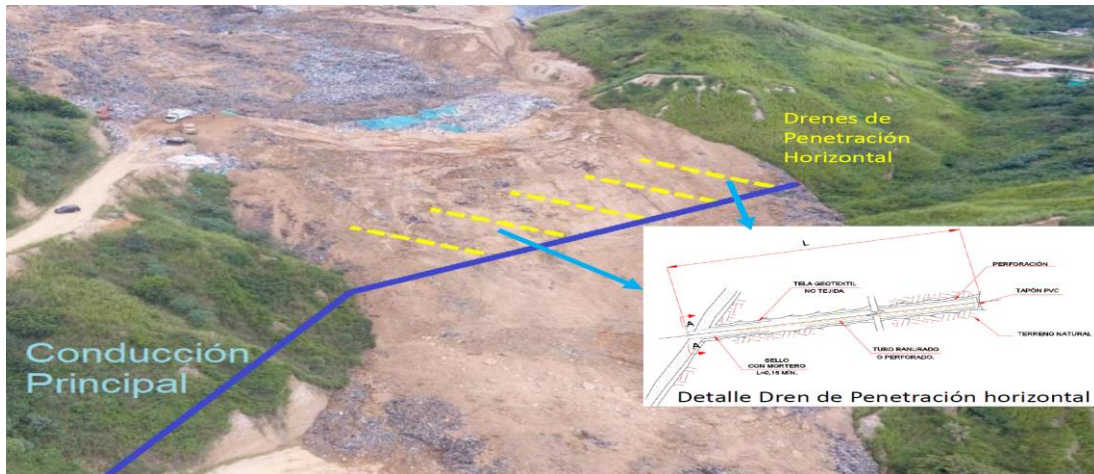


Figura 44. Localización drenes de penetración horizontal en la celda 1. Adaptado de: EMAB S.A. E.S.P



Figura 45. Construcción de pozos de extracción y drenes de penetración horizontal. Adaptado de: EMAB S.A. E.S.P

6. Conclusiones

Las unidades geológicas superficiales que se presentan en el área se encuentran distribuidas así: 51% equivale a los suelos de llenos antrópicos del Carrasco, el 33% al suelo gravoso del miembro órganos, el 7% a suelos de flujos de escombros antiguos, el 3% a el suelo miembro limos rojos, 3% a la asociación de llenos antrópicos del Carrasco con suelo de flujos de escombros antiguos y con el 1% el suelo de miembro gravoso, así como también con 1% el suelo de miembro finos.

Se establecen las condiciones del perfil de la Formación Bucaramanga según el modelo geológico geotécnico encontrado de acuerdo a los espesores encontrados en las tomografías eléctricas 2D (T1, T2 y T3) y las propiedades geomecánicas corresponden a la caracterización geotécnica realizada en el área de estudio con las unidades geológicas superficiales encontradas como lo son la formación Bucaramanga (miembro órganos – SFT3), suelos de lleno antiguo (zona de disposición clausurada o en proceso con más de dos años de cierre) y llenos nuevos.

De acuerdo con las observaciones de campo efectuadas, a la interpretación de las Tomografías Eléctricas 2D T1, T2, T3 y a la caracterización geotécnica realizadas en el sector de la Celda 1 del Relleno Sanitario El Carrasco, sector de interés del monitoreo geotécnico, se concluye que:

- El sector de interés está constituido por zonas planas y laderas con pendientes moderadamente empinadas a empinadas, con valles intermedios.
- De acuerdo con el marco geológico regional y local la zona donde se realizaron las Tomografías Eléctricas 2D T1, T2 y T3, la respuesta Geoeléctrica, además de la información de campo y fotogeológica permiten, definir dos tipos de cuaternario, un depósito areno-arcilloso,

limo-arcilloso y gravas mezclados con rellenos antropogénicos suprayaciendo a un depósito más consolidado conformados por arenas, arcillas y gravas, constituidos esencialmente por fragmentos de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias correlacionables con el Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga. Estos depósitos cuaternarios suprayacen a un depósito de edad Jurásica, compuesto por areniscas finas, limolitas intercaladas y arcillolitas, muy fracturadas y meteorizadas correlacionables con la Formación Girón.

- Esta litología corresponde plenamente con las unidades geoelectricas identificadas en la interpretación de las correspondientes Imágenes Eléctricas 2D, y a la caracterización geotécnica efectuada para su correlación de la siguiente manera:

- ✓ La parte superior de la imagen eléctrica (Zona A) con espesor variable entre los 5 y los 65 m; esta unidad está compuesta por capas de basura y desechos orgánicos intercaladas con niveles de arenas y arcillas compactadas. Hacia la parte inferior se presenta el relleno sanitario con conductividades bajas, relacionadas con posibles lixiviados.

- ✓ La Zona B presenta características muy conductivas, probablemente corresponda a zonas muy húmedas. El depósito está constituido con niveles polimícticos de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura, se correlaciona con el Miembro Órganos de la Fm Bucaramanga.

- ✓ Hacia el sector NW de la Zona C o parte inferior de la imagen eléctrica presenta un depósito de edad Jurásica, compuesto por areniscas finas, limolitas intercaladas y arcillolitas, muy fracturadas y meteorizadas correlacionables con la Formación Girón y corresponde a valores de resistividad entre los 30 y 100 Ω -m.

- Se puede interpretar en las imágenes eléctricas bajo acumulamiento de lixiviados en el lleno antropogénico específicamente en el costado occidental del relleno sanitario.
- Existe una probabilidad de riesgo en la cual las zonas saturadas con lixiviados disminuirían los parámetros mecánicos del talud; estos tendrían incidencia en la ecuación de estabilidad y podrían generar afectaciones por fenómenos de remoción en masa.
- No se aprecian en las imágenes eléctricas estructuras de fallamiento en el área en la cual se ejecutaron las 3 líneas de tomografías eléctricas 2D.
- Se aclara que los resultados producto de la ejecución de las tres tomografías obedecen a interpretación de información tomada en campo a través de métodos geofísicos, los cuales debido a su naturaleza de interpretación son susceptibles de nuevos análisis conforme se desarrollen métodos directos de investigación geotécnica insitu.

7. Recomendaciones

De acuerdo a la ubicación del acumulamiento de lixiviados en la celda 1 del sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco encontrado en las tomografías eléctricas 2D T1, T2 y T3 se recomiendan las siguientes medidas para el control de flujos subterráneos, con el objetivo de abatir los depósitos de lixiviados en este sector y sumado a ello garantizar óptimas condiciones de estabilidad de esta celda:

- Construir drenes horizontales o drenes de penetración horizontal, ya que corresponde a un sistema de drenaje profundo en el que se utiliza tubería perforada de diámetro entre 2 y 3 pulgadas, tipo PVC, colocadas a través del suelo, mediante un alineamiento subhorizontal o ligeramente inclinada (pendiente de 5 a 20%), con la cual se abatiría el nivel de lixiviados hasta una altura que incremente la estabilidad del talud, según las ecuaciones de estabilidad ante fenómenos de remoción en masa. El efecto práctico de un sistema de drenes de penetración es introducir dentro del terreno una frontera con presión nula. Si la presión del agua en la zona donde se instalan los drenes es superior a la atmosférica, se crea entre la fila de drenes y su zona aledaña un gradiente hidráulico que hace fluir el agua hacia los drenes, los cuales la trasladan luego hacia el exterior por el efecto gravitacional.

Los drenes de penetración horizontal deben complementarse con un sistema de captación (cajas colectoras para cada subdren) y conducción hasta los puntos de descarga permisibles (Planta de tratamiento de lixiviados). Este tipo de subdren requiere de un mantenimiento periódico, mediante la inyección de agua a presión para limpiar los orificios de drenaje y remover el material sedimentado alrededor de la tubería.

- Instalar piezómetros como sistema de monitoreo para garantizar la estabilidad de la celda 1, llevar la trazabilidad de las variaciones de niveles de lixiviados y generar columnas verticales en las cuales se evacuarán de igual forma acumulamiento de gases. Este sistema previene infiltraciones que se pudiesen presentar en la celda de disposición que llegarían a contaminar el subsuelo.

- Es posible implementar un sistema similar al descrito anteriormente en el cual las perforaciones revestidas se convertirían en pozos de extracción de gases; sin embargo, la tubería debe garantizar resistencia a la quema de estos gases en la superficie.

- Implantar pozos de bombeo para extracción forzada de lixiviados de manera vertical dadas las condiciones morfométricas de la celda 1, este sistema permite medir los niveles piezométricos de los lixiviados y según se requiera, abatir los niveles cuando se generen concentraciones que pudiesen comprometer la integridad física de los taludes ubicados en el costado occidental del relleno sanitario El Carrasco por fenómenos de remoción en masa.
- La celda 1 debe ser instrumentada con inclinómetros y piezómetros para determinar deformaciones del terreno y medir presiones de poros respectivamente, adicionalmente se debe generar una malla topográfica para llevar líneas de control en toda el área de la celda.
- La ubicación de las obras y medidas descritas anteriormente tuvieron en cuenta un cómodo acceso al lugar de ejecución, facilidad en el suministro de agua para la refrigeración durante las perforaciones, zonas cercanas a pie de taludes y optimización de recursos disponibles en cada una de las actividades técnicas necesarias para cumplir a cabalidad con el abatimiento, captación y correcta conducción de lixiviados acumulados en la celda 1 del relleno sanitario.
- Finalmente se recomienda ejecutar monitores periódicos cada 6 meses por medio de investigaciones geofísicas (tomografías 2D) en la celda 1 teniendo en cuenta los amarres topográficos para superponerlas con las ejecutadas en el presente estudio y así garantizar una correcta identificación en la acumulación de lixiviados en este sector del sitio de disposición final El Carrasco.

Referencias Bibliográficas

- Aparicio, F. (1989). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México D.F., México: Editorial Limusa.
- Aparicio, F. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México D.F., México: Editorial Limusa
- Arias, O. E. (2011). Exploración Geotécnica-relaciones eléctricas. Medellín.
- Astier, J.L. (1975). Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Madrid España, Editorial Paraninfo.
- Auge, M. (2008). Métodos geo eléctricos para la prospección de agua subterránea. Buenos Aires.
- Bear, J. (1979). Hydraulics of Groundwater. New York, EEUU. Mc Graw Hill
- Bueno y Solarte. (1994). Geología, geotecnia y comportamiento erosivo de las áreas de reserva forestal de Bucaramanga. Bucaramanga.
- Cantos, F. (1978). Tratado de Geofísica Aplicada. Madrid, España.
- Custodio, E., y Llamas, M. (1978). Hidrología Subterránea. Barcelona, España. Editorial Omega S. A.
- Dey, A. and Morrison, H.F., (1979a). Resistivity modelling for arbitrary shaped two dimensional structures. Geophysical Prospecting 27, 1020-1036.
- De Porta, J., (1959). La terraza de Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander (Colombia), Bol de Geología, N°3, p. 3-13
- Durán, J. A. (2012). Aplicación de las ecuaciones de maxwell en el dominio de la frecuencia al análisis electromagnético de un medio rocoso. Bogotá D.C. Universidad nacional de Colombia.

- EPM. (2008). Normas Técnicas medida de resistividad eléctrica del suelo. Obtenido de https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/proveedores_y_contratistas/normas_y_especificaciones/normas_aereas/grupo_6_Normas_de_montajes_complementarios/RA6-014MEDIDADERESISTIVIDAD_V3.pdf
- Etayo, F., et al., (1983). Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Publicaciones geológicas especiales INGEOMINAS, (14-I): 235 p.
- Galvis García, E., & Cárdenas Valencia, J. D. (2011). Manual para la interpretación del perfil de resistividad. Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/2568/1/621317C266.pdf>
- Gavilán, G. (2000) Manual de diseño de drenajes superficiales y sub-superficiales. Bucaramanga, Colombia: Editorial Universidad Industrial de Santander.
- INGEOMINAS, (1973). Boletín y Mapa Geológico de los Cuadrángulos H-12. Bucaramanga, Colombia.
- INGEOMINAS, (1997). Microzonificación sísmica de Santa fe de Bogotá. Bogotá, Colombia
- INGEOMINAS, (1999). Mapa geológico generalizado del departamento de Santander
- INGEOMINAS, (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, Colombia.
- INGEOMINAS, (2002) Evaluación de agua subterránea en el área metropolitana de Bucaramanga, Santander a escala 1:25000.
- INGEOMINAS, (2004) Modelo Geológico - Geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga, Colombia
- INGEOMINAS, (2007) Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el macizo de Santander

- INGEOMINAS, (2009) Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta
- Julivert, M. (1958). La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S. A.)
- Julivert, M. (1961). Geología de la Vertiente W de la Cordillera Oriental en el Sector de Bucaramanga
- Julivert, M. (1963). Nuevos datos sobre la Dinámica del Ámbito del Macizo de Santander durante el Secundario (Cordillera Oriental, de Colombia)
- Julivert, M. (1963). Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga
- Julivert, M., & Téllez, N. (1963). Presencia de Fallas de edad Precretácica y Post- Girón (Juratriásico) en el Flanco W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia)
- Kearey, P. and Brooks, M. (1991). An Introduction to Geophysical Exploration, 2nd Edition: Blackwell Science.
- Ministerio de Minas y Energías. (2003). Glosario técnico minero. Obtenido de <http://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico. (2009). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS 2000, Título F, Colombia.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Viceministerio de Vivienda, (2010). Reglamento de Construcción sismo resistente NSR-10, título H, Colombia.
- Nania, L., Molero E. (2007). Manual Básico de HEC-RAS. Granda, España: Editorial Universidad de Granada.

Rodríguez Barrera, M. A. (2011). Introducción a las medidas eléctricas. Bogotá.

Rodríguez, M. (2012) Regresión Lineal. En línea Disponible en:
[https://cristian415.wikispaces.com/file/view/5+-+Regresi%C3%B3n+Lineal+-+Curvilinea+-+Multiple+\(sin+PH\).pdf](https://cristian415.wikispaces.com/file/view/5+-+Regresi%C3%B3n+Lineal+-+Curvilinea+-+Multiple+(sin+PH).pdf) Universidad Católica del Maule.

Silvester P.P. and Ferrari R.L., 1990, Finite elements for electrical engineers (2nd. Ed.).
Cambridge University Press.

Ven Te Chow. (2000). Hidrología Aplicada. Colombia. Bogotá. Editorial Mc Graw – Hill, Nomos
S.A.