

Tabla de contenido

Sección 1	Introducción	1-2
Sección 2	Descripción de los trabajos	2-1
2.1	Objetivos	2-1
2.2	Alcance	2-2
2.3	Metodología.....	2-2
Sección 3	Campaña de exploración para ingeniería de detalle	3-1
3.1	Ubicación del área de estudio, topografía y características del área de trabajo.....	3-1
3.1.1	Ubicación del área de estudio	3-1
3.1.2	Topografía y características de la zona del proyecto	3-2
3.2	Estructuras proyectadas en la Fase I	3-2
3.3	Normatividad.....	3-4
3.4	Exploración del subsuelo	3-5
Sección 4	Condiciones geológicas.....	4-1
4.1	Formación Cacho (E1C).	4-2
4.2	Formación Bogotá (E1-2b).....	4-3
Sección 5	Caracterización geotécnica detallada del sitio	5-2
5.1	Propiedades índice y mecánicas del suelo	5-2
5.1.1	Contenido de humedad natural y límites de Atterberg	5-2
5.1.2	Contenido de arenas	5-4
5.1.3	Contenido de material orgánica.....	5-6
5.1.4	Peso Unitario total	5-6
5.1.5	Resistencia al corte no drenada	5-7
5.1.6	Módulo de elasticidad	5-10
5.1.7	Ángulo de fricción efectiva	5-11
5.1.8	Relación de sobreconsolidación	5-13
5.1.9	Índice de recompresión	5-14
5.1.10	Índice de compresibilidad.....	5-15
5.1.11	Coefficiente de consolidación	5-16
5.2	Línea de refracción sísmica.....	5-17
5.3	Ensayos de mineralogía	5-17
Sección 6	Perfiles estratigráficos	6-2
Sección 7	Análisis estadístico de la variación de las propiedades del subsuelo en profundidad.....	7-2
Sección 8	Posición de nivel de agua subterránea	8-2

8.1	Lectura inicial	8-2
8.2	Piezómetro abierto.....	8-5
8.3	Piezómetro tipo Casagrande	8-11
Sección 9	Sistema de cimentación de estructuras	9-1
9.1	Tipos de fundación y profundidades.....	9-1
9.1.1	Zapatas	9-2
9.1.2	Losa de fundación.....	9-2
9.1.3	Sistema de drenajes	9-2
Sección 10	Estabilidad de los taludes de corte	10-1
Sección 11	Conclusiones	11-2

Lista de Figuras

Figura 2-1 Metodología empleada para la realización del presente estudio	2-2
Figura 3-1 Localización general del área de estudio de la PTAR Canoas	3-1
Figura 3-2 Equipos de perforación empleado DL800.....	3-7
Figura 3-3 Frecuencia de muestreo – Recuperación de una muestra en 1,0 m de perforación.....	3-7
Figura 3-4 Frecuencia de muestreo – Recuperación de una muestra en 1,5 m de perforación.....	3-8
Figura 3-5 Almacenamiento de muestras inalteradas y alteradas en cajas de madera	3-8
Figura 4-1 Perforación PF-14. Detalles de núcleos de roca biogénicas como algas fósiles y rodolitos.	4-2
Figura 4-2 Perforación PF-14. Detalles de núcleos de roca biogénicas como algas fósiles y rodolitos.	4-2
Figura 5-1 Variación del contenido de humedad natural y Límites de Atterberg.....	5-3
Figura 5-2 Carta de plasticidad de Casagrande – PTAR CANOAS FASE I	5-4
Figura 5-3 Variación del contenido de finos en profundidad.....	5-5
Figura 5-4 Variación del contenido de materia orgánica en profundidad.....	5-6
Figura 5-5. Variación del peso unitario en profundidad en toda el área de la Fase I.....	5-7
Figura 5-6 Variación en profundidad de la resistencia al corte no drenada.....	5-8
Figura 5-7 Resistencia la corte no drenada del ensayo CPTU-03 para NKT = 14.....	5-9
Figura 5-8 . Resistencia la corte no drenada del ensayo CPTU-03 para NKT = 20.....	5-10
Figura 5-9 Variación en profundidad del módulo de elasticidad.	5-11
Figura 5-10 Variación en profundidad del ángulo de fricción efectivo.....	5-12
Figura 5-11 Variación de la relación de sobreconsolidación en profundidad	5-13
Figura 5-12 Variación del índice de recompresión en profundidad	5-14
Figura 5-13 Variación del índice de compresibilidad en profundidad.....	5-15
Figura 5-14 Variación de índice de consolidación en profundidad	5-16
Figura 6-1 Localización en planta de perfiles estratigráficos.....	6-2
Figura 6-2 Perfiles estratigráficos	6-3
Figura 7-1 Estimación de peso unitario total (γ_t) en profundidad para la zona de tratamiento preliminar de la PTAR Canoas.....	7-3
Figura 8-1 Lecturas de nivel freático detectado a inicio de las perforaciones.....	8-4
Figura 8-2 Tubo perforado recubierto por geotextil.....	8-5
Figura 8-3 Lecturas de piezómetros abiertos.....	8-6
Figura 8-4 Lecturas de piezómetros casagrande	8-2
Figura 10-1 Imagen del modelo analizado por el método de Bishop con superficie de falla circular.....	10-3
Figura 10-2 Factor de seguridad obtenido por el método de Bishop con superficie de falla circular bajo condiciones dinámicas, saturado y con sobrecarga.....	10-3

Lista de tablas

Tabla 3-1 Definición de grupos de estructuras de la Fase I de la PTAR Canoas	3-2
Tabla 3-2 Coordenadas, profundidades totales, metros de perforación en suelo y metros de perforación en roca.	3-9
Tabla 3-3 Número de muestras inalteradas y alteradas obtenidas en perforaciones mecánicas.	3-10
Tabla 3-4 Coordenadas, profundidades totales, metros de perforación sobre el lecho del río	3-12
Tabla 3-5 Coordenadas, profundidades totales de sondeos CPTu.	3-13
Tabla 3-6 Coordenadas, profundidades totales de sondeos DMT.	3-13
Tabla 3-7 Coordenadas, profundidades de pruebas de disipación de presión de poros.	3-14
Tabla 3-8 Coordenadas y profundidades totales de ensayos Down Hole	3-14
Tabla 3-9 Localización de ensayos Piezómetros instalados.....	3-15
Tabla 3-10 Programa de ensayos de laboratorio y cantidad ensayos ejecutados y analizados	3-16
Tabla 8-1 Registros de lectura piezómetros abiertos.....	8-7
Tabla 8-2 Registros de lectura piezómetros tipo Casagrande	8-3
Tabla 9-1 Sistema de cimentación recomendada.....	9-1
Tabla 10-1 Factores de seguridad (FS) básicos mínimos directos para el análisis de capacidad portante y estabilidad de taludes	10-1
Tabla 10-2 Parámetros característicos promedio de las capas 1,2 y 3.	10-2
Tabla 10-3 Parámetros asignados en la modelación de estabilidad de taludes, con $\phi=0$	10-2
Tabla 10-4 Factores de seguridad obtenidos en el análisis de estabilidad de taludes bajo condiciones críticas.	10-4
Tabla 10-5 Factores de seguridad para taludes 1,5 H: 1,0V y altura de 7 m.....	10-4

Sección 1

Introducción

El Producto 7 del contrato de consultoría N° 1-02-25500-0690-2011 suscrito entre el ACUEDUCTO DE BOGOTÁ y el Consorcio CDM Smith – INGESAM para realizar el diseño a nivel de ingeniería de detalle de la planta de tratamiento de aguas residuales de “Canoas” en los componentes asociados al sistema de tratamiento primario con asistencia química, comprende la ejecución de los trabajos de campo para el desarrollo de la ingeniería de detalle de la Fase I de la PTAR Canoas.

La mayor parte de los trabajos de campo contemplados en el Producto 7 conciernen a actividades del componente geotécnico. El presente documento: Producto 7. Volumen 1 – Geotecnia - v2, contiene todas las actividades ejecutadas durante la exploración del subsuelo y la evaluación geotécnica de detalle del sitio destinado para la construcción de la planta de tratamiento, necesarios para abordar la ingeniería de detalle de la fase I del proyecto (tratamiento primario avanzado).

Los trabajos de campo y laboratorio concernientes a la exploración del subsuelo se realizaron entre el 17 de enero y el 15 de abril de 2015. Estos trabajos fueron ejecutados por las empresas LOGAN DRILLING COLOMBIA S.A.S, INGENIERÍA Y GEORIEGOS S.A.S, JEOPROBE y el laboratorio de SUELOS Y PAVIMENTOS GREGORIO ROJAS & CIA LTDA, a través de un sub-contrato suscrito con el Consorcio CDM Smith - INGESAM.

El Informe está organizado en siete secciones, así:

1. Introducción
2. Descripción de los trabajos. Esta sección presenta una descripción de los trabajos realizados, incluyendo objetivos, alcances, metodología y las limitaciones del informe.
3. Campaña de exploración para ingeniería de detalle. Incluye una breve descripción de la localización del sitio destinado para la fase I de la PTAR Canoas y todas las actividades realizadas durante la campaña de exploración del subsuelo para ingeniería de detalle.
4. Condiciones geológicas: En esta sección se presenta un análisis complementario al presentado en los trabajos preliminares de campo para ingeniería. Análisis basado en los trabajos desarrollados para la ingeniería de detalle.
5. Caracterización geotécnica detallada del sitio. En esta sección se presenta la caracterización geotécnica detallada del subsuelo, basada en las actividades incluidas en las secciones anteriores.
6. Perfiles estratigráficos. En esta sección se presenta la metodología empleada para la definición de los perfiles estratigráficos y los perfiles generados para ingeniería de detalle.
7. Análisis estadístico de la variación de las propiedades del subsuelo en profundidad.
8. Posición de nivel de agua subterránea.

9. Sistema de cimentación de estructuras. En esta sección se presenta los sistemas de cimentación recomendado para las diferentes estructuras de la PTAR Canoas y las limitaciones que rigen el sistema.

10. Estabilidad de los taludes de corte

11. Conclusiones

Adicionalmente, este Volumen incluye siete anexos con el siguiente contenido:

- Anexo 1: Localización de puntos de exploración del subsuelo
- Anexo 2: Resúmenes gráfico de las propiedades del suelo
- Anexo 3: Perfil fotográficos de perforaciones
- Anexo 4: Informe de actividades de campo y registros de ensayos de campo
- Anexo 5: Resultados de ensayos de laboratorio de propiedades índice, de resistencia y de compresibilidad
- Anexo 6: Análisis de resultados de ensayos de laboratorio
- Anexo 7: Resumen y Análisis de propiedades índice, de resistencia y de compresibilidad del suelo
- Anexo 8: Perfiles estratigráficos de la Fase I
- Anexo 9: Planos de localización de piezómetros y registro de niveles freáticos
- Anexo 10: Estudio de respuesta sísmica local y susceptibilidad por ablandamiento
- Anexo 11: Formatos de captura de información de la EAB (versión digital)

Sección 2

Descripción de los trabajos

En esta sección se presenta la descripción general de los trabajos de campo y oficina ejecutados para la realización de la evaluación geotécnica para la ingeniería de detalle de la Fase I de la PTAR Canoas. Esta descripción incluye los objetivos, el alcance y la metodología aplicada por la Consultoría para ejecutar los trabajos objeto de este informe.

Es importante notar que las actividades ejecutadas para el Producto 7 se ejecutaron siguiendo los lineamientos dados en la Norma Técnica de Servicios de la EAB, NS-010 Requisitos para la elaboración y presentación de estudios geotécnicos, versión 2.3. Adicionalmente, se tuvieron en cuenta las directrices dadas en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS-2000), el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) y también los requerimientos establecidos en las Condiciones y Términos de la Invitación (CTDI).

2.1 Objetivos

El objetivo principal del producto 7, es presentar la caracterización geotécnica detallada del subsuelo para la Fase I (tratamiento primario avanzado) de la PTAR Canoas, perfiles estratigráficos y establecer las condiciones predominantes en las áreas donde se construirán las diferentes estructuras y las obras civiles que la componen. Lo anterior basado en los trabajos preliminares de campo (Producto 2), trabajos de campo para ingeniería de detalle (Producto 7), supervisión de trabajos de perforación y sondeos, visitas de reconocimiento del área de estudio y recopilación de información de estudios previos realizada en el Producto 1 - Revisión de información.

Los objetivos secundarios de la evaluación geotécnica detallada son:

- Optimizar los recursos disponibles para el desarrollo del Producto 7 y ejecutar la campaña de exploración del subsuelo, garantizando el cubrimiento de todas las estructuras contempladas en la Fase I.
- Obtener el mayor número de muestras inalteradas o representativas, siempre y cuando las condiciones del suelo permitan su obtención. En caso de suelos granulares o de consistencia media a dura se realizarán ensayos SPT y la obtención de muestra alterada.
- Programar y ejecutar un programa de ensayos de laboratorio que satisfaga las condiciones de diseño de las diferentes estructuras y obras civiles contempladas en la Fase I de la PTAR Canoas.
- Determinar los perfiles estratigráficos detallados del suelo en el sector de la Fase I.
- Monitorear el comportamiento de los niveles de agua subterránea o nivel freático en la zona de estudio.

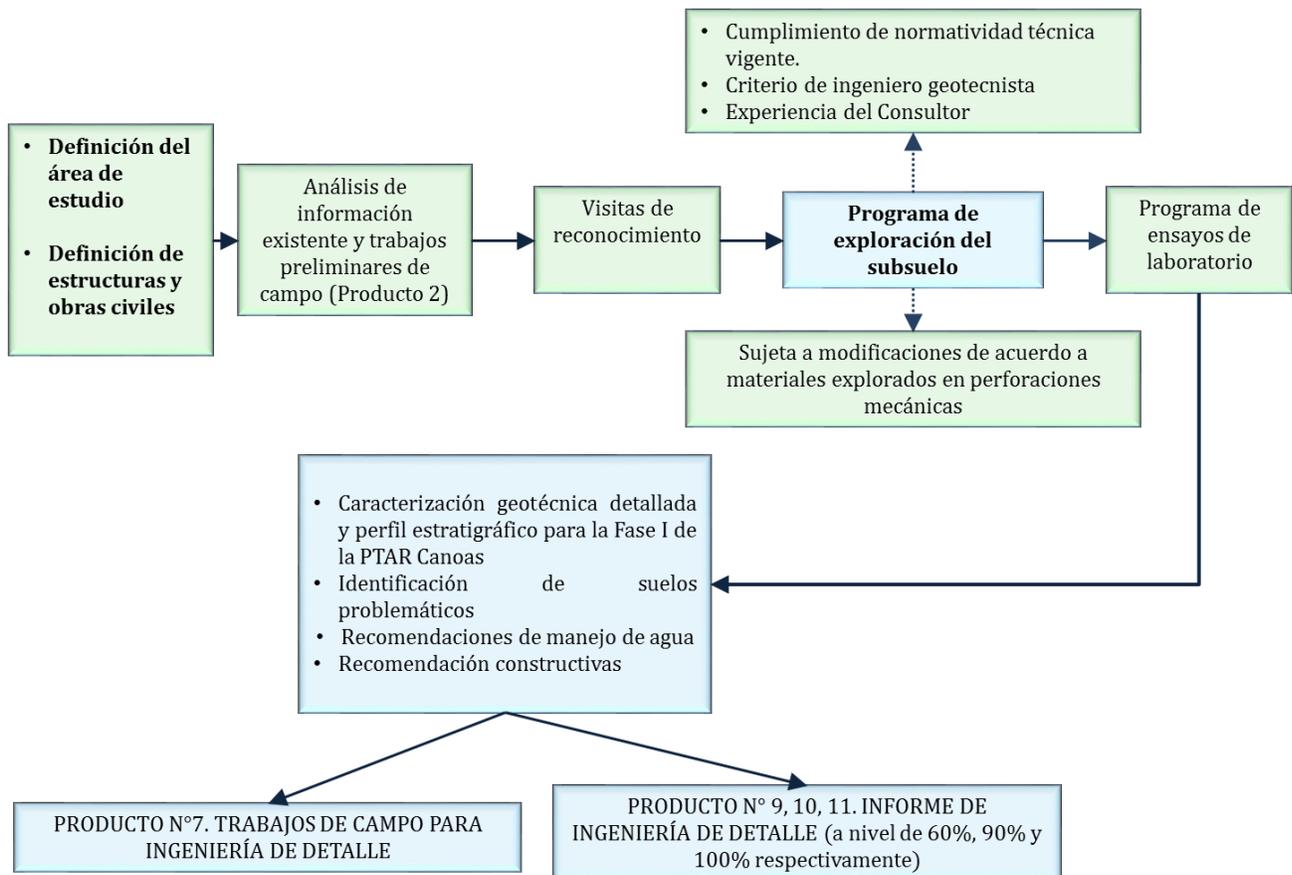
2.2 Alcance

Presentar el reporte de todas las actividades de campo, laboratorio de oficina realizadas para determinar la caracterización geotécnica y análisis de propiedades geotécnicas detallada por zonas de estructuras y presentar recomendaciones de diseño generales de cimentación para las estas zonas. En el Producto 10 Ingeniería de detalle (90%) se presentarán las propiedades del subsuelo empleadas en los diseños detallados de las diferentes estructuras, dimensiones y niveles de excavación y de fondo de las estructuras.

2.3 Metodología

La metodología de trabajo empleada para los trabajos de campo para ingeniería de detalle se presenta en la Figura 2-1.

Figura 2-1 Metodología empleada para la realización del presente estudio



Sección 3

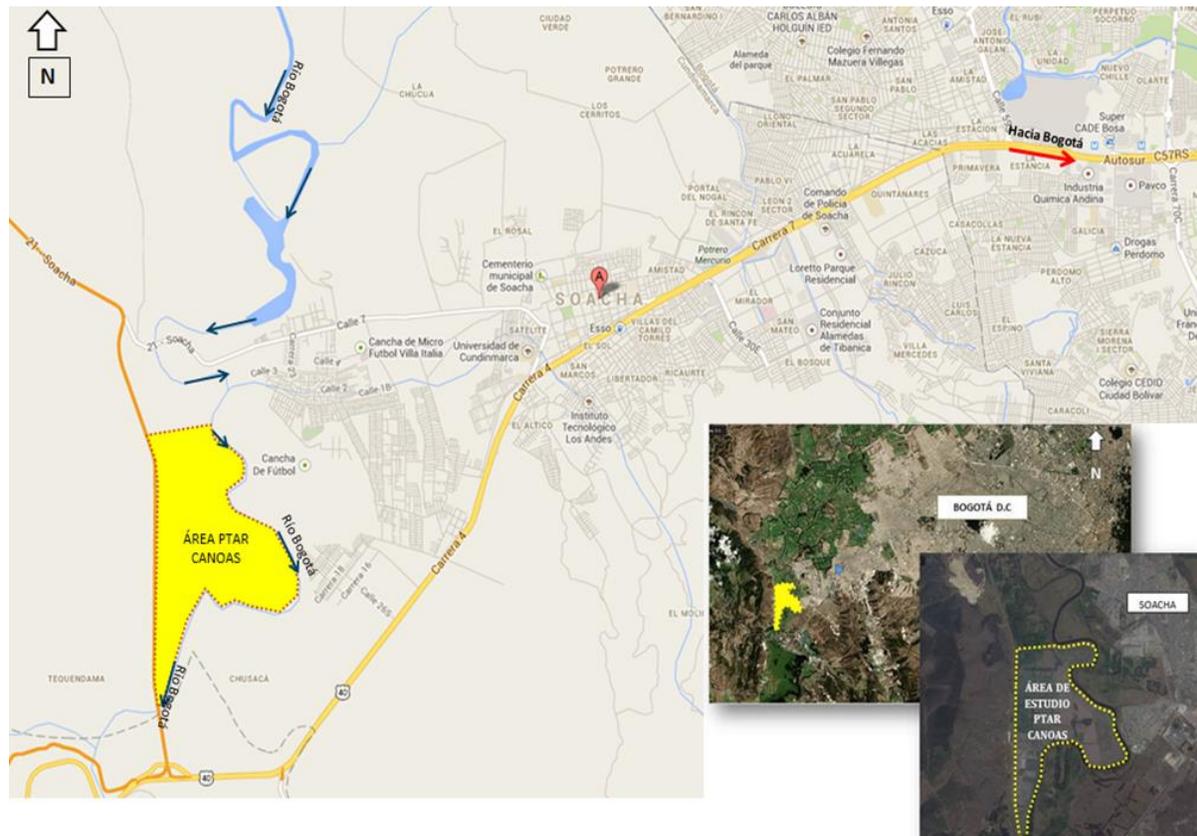
Campaña de exploración para ingeniería de detalle

3.1 Ubicación del área de estudio, topografía y características del área de trabajo

3.1.1 Ubicación del área de estudio

El área de construcción de la PTAR Canoas se localiza dentro de la cuenca media del río Bogotá, en jurisdicción del municipio de Soacha, en el sector identificado por la CAR como Soacha – Salto del Tequendama. Los terrenos del predio se localizan en la margen occidental del río Bogotá, entre el cauce del río y la Avenida perimetral de la Sabana, en el tramo vial que comunica el embalse del Muña con el sector de Mondoñedo. En la Figura 3-1 se presenta la localización general del área de estudio de la PTAR Canoas.

Figura 3-1 Localización general del área de estudio de la PTAR Canoas



Fuente de imagen: Google Maps y Bing.

3.1.2 Topografía y características de la zona del proyecto

La zona del proyecto se caracteriza por estar conformada por dos terrazas con depresiones topográficas, que limitan al occidente con un afloramiento rocoso de la Formación Arenisca Labor y Tierna, y al oriente con la margen derecha del río Bogotá. La pendiente natural del terreno desciende en dirección occidente – oriente, variando entre las cotas 2.560 y 2.540 m.s.n.m, con un valor medio del 1,0%. Mientras tanto, en la dirección norte – sur, el terreno es casi plano, con una cota media de 2.550 m.s.n.m.

La base topográfica empleada para el análisis dentro del presente informe geotécnico corresponde al levantamiento topográfico realizado por el subcontratista DRAWCOM para el Consorcio CDM SMITH – INGESAM dentro del Producto 2 (Trabajos de campo para ingeniería preliminar; trabajos realizados entre julio y agosto de 2013).

El área de estudio actualmente es de uso ganadero, cultivos y pastos y el sector sur se emplea para cultivos de legumbres. Los pastos son inundados periódicamente mediante una compuerta que toma aguas del río Bogotá; estas inundaciones se reflejan claramente en zonas de anegación presentes en la terraza alta del predio.

En la terraza alta de la zona existen árboles de eucalipto de diámetros entre 0,2 y 1,5 m y alturas aproximadamente de hasta 20 m. Estos árboles están alineados en sentido norte - sur y oriente - occidente y se usan como separadores de áreas de ganado. Para mayor detalle puede consultarse los planos topográficos presentados en el Producto 2.

Para consulta del componente geológico, geomorfológico y registro fotográfico de las geoformas que componen el área de la PTAR Canoas se debe consultar el Producto 2 (Trabajos de campo preliminares, Volumen 2, Evaluación geotécnica preliminar del sitio destinado para la PTAR Canoas), presentado en diciembre de 2013 por la Consultoría.

3.2 Estructuras proyectadas en la Fase I

El proyecto PTAR Canoas Fase I contempla la construcción de las estructuras presentadas en la Tabla 3-1. Las dimensiones descritas corresponden a lo presentado en el Producto 8- Informe de ingeniería de detalle (a nivel del 30%).

Tabla 3-1 Definición de grupos de estructuras de la Fase I de la PTAR Canoas

Grupo N°	Grupo de estructuras	Estructuras	Dimensiones preliminares de estructuras	Cota terreno m.sn.m.	Cota promedio base cimentación
1	Tratamiento Preliminar	1 Cámara inicial de la PTAR	BxL: 13m x 12,85m Altura: 6,14m	2550	2548
		12 equipos de cribado medio y fino	BXL: 27m x 23m Altura: 3,74m	2552 - 2553	2549

Grupo N°	Grupo de estructuras	Estructuras	Dimensiones preliminares de estructuras	Cota terreno m.sn.m.	Cota promedio base cimentación
		12 tanques de desarenadores aireados	BXL: 27m x 23m Altura: 3,74m	2552-2553	2546
		Mezcla rápida	BXL: 20,4m x 33,75m Altura: 5,45 m	2552 - 2553	2546
		Almacenamiento de cloruro férrico	BXL: 20m x 20m	2550,45	2548
		Almacenamiento de polímero	BXL: 20m x 30m	2550	2548
2	Sedimentadores primarios	Cadica general de sedimentadores primarios	BXL: 15,95 m x 17,4 m H: 6 m, incluida la entrada en el fondo del box	2552,5	2543
		16 Tanques para sedimentadores primarios	Diámetro : 50,6 m Altura promedio: 11,35m	2552,5	2540
3	Espesadores por gravedad y desarenación de lodo primario	6 Tanques para espesamiento por gravedad	Diámetro: 25 m Altura: 7 apróx	2553 - 2551.5	2546
4	Digestores	6 tanques para digestores anaeróbicos	Diámetro: 27 m Altura: 26,7 apróx	2554-2551.5	2548

Grupo N°	Grupo de estructuras	Estructuras	Dimensiones preliminares de estructuras	Cota terreno m.sn.m.	Cota promedio base cimentación
5	Edificios administrativo y Casino, procesos y mantenimiento de equipos	Cribado de lodos espesados Almacenamiento de lodos espesados Edificio de predeshidratación Hidrólisis térmica Almacenamiento de polímero Edificio de deshidratación Subestación eléctrica PTAR Sistema de cogeneración Zona de lavado y mantenimiento de vehículos Edificio de operaciones y mantenimiento Báscula y Portería	Edificios entre 3 y 6 niveles	Terreno natural contemplando descapote de 0,5 a 1,0 m	2549
6	Box Culvert y vías	Box Culvert y vías	Sección: BxH: 6m x 4m	2551-2555	2553,16 - 2545
7	Vías costado norte	N.D.**	N.D.**	2550	2545,5
8	Estructura de descarga al río Bogotá.	N.D.**	BxL: 20m x 50m	2542-2543	2539

** Información no disponible

3.3 Normatividad

La exploración del subsuelo se ejecutó con base en los procedimientos de calidad y normatividad establecidos por el ACUEDUCTO DE BOGOTÁ en su Norma Técnica NS-010 “Requisitos para la Elaboración y Presentación de Estudios Geotécnicos”, así como las recomendaciones contenidas en la Norma NSR-10 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – Capítulo H, Estudios

Geotécnicos) y el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS-2000, Título G, Sección G.2, Aspectos Geotécnicos). Sin embargo, se hacen las siguientes anotaciones:

- Las Condiciones y Términos de la Invitación que constituyen el documento base con el cual se contrató la presente consultoría, señalan en su numeral 5.5.2.1.2.2 Número mínimo de sondeos y profundidad, lo siguiente: “El número mínimo de sondeos se regirá por el RAS, Tabla G.2.2. Número mínimo de sondeos. Asumiendo un grado de dificultad alto para las excavaciones de acuerdo con el tipo de suelo esperado, y teniendo en cuenta una variabilidad baja del subsuelo y un nivel de complejidad del sistema bajo, se considera y se recomienda que se debe realizar una perforación cada 250 m con una profundidad mínima de 30 m.” Aunque no hay discusión con respecto al grado de dificultad alto de las excavaciones y la variabilidad baja del subsuelo, es evidente que de acuerdo con el mismo RAS-2000, el nivel de complejidad del sistema corresponde a un nivel alto y no bajo, como lo indica el documento en mención. Si se aplicara este criterio de manera correcta, la distancia entre cada perforación debería ser de 100 m, según la tabla antes citada.
- Por otra parte, es importante aclarar que las normas establecidas en el Título G del RAS-2000, aplican exclusivamente a estudios geotécnicos para el diseño de obras lineales de acueducto y alcantarillado. Adicionalmente, la definición del número mínimo de sondeos referida en la Tabla G.2.2, corresponde a la realización de estudios definitivos y no preliminares, como es el presente caso. Por último, es importante señalar que este Reglamento no hace ninguna referencia a requisitos para estudios geotécnicos de estructuras hidráulicas como las que se prevén en la PTAR Canoas.
- Otras normas que rigen los estudios de exploración y muestreo de un sitio para la construcción de obras civiles, corresponden a la Norma Técnica NS-010 del ACUEDUCTO DE BOGOTÁ (Requisitos para la elaboración y presentación de estudios geotécnicos) y al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-resistente, Norma NSR-10.
- Por su parte, la Norma NSR-10 determina en su Capítulo H.3 – Caracterización Geotécnica del Subsuelo, el número mínimo de sondeos y su profundidad para diferentes categorías de unidades de construcción, las cuales se refieren exclusivamente a edificaciones o construcciones cuyo uso primordial es la habitación u ocupación por seres humanos. Según su Artículo 3°, las disposiciones de este reglamento no comprenden el diseño y construcción de estructuras especiales como puentes, torres de transmisión, torres y equipos industriales, muelles, estructuras hidráulicas y todas aquellas estructuras cuyo comportamiento dinámico difiera del de edificaciones convencionales, o no estén cubiertos dentro de las limitaciones de cada uno de los materiales estructurales prescritos. De acuerdo con esto, para el caso de la PTAR Canoas las disposiciones de esta Norma sólo serán aplicables al caso de los edificios que hagan parte de las instalaciones de la planta.

3.4 Exploración del subsuelo

La localización de los puntos de exploración corresponde estrictamente a la ubicación de las estructuras hidráulicas, edificios, y obras civiles como: excavaciones contempladas para la etapa de construcción (temporales), cortes para conformación de taludes permanentes y vías de acceso. De acuerdo con la distribución espacial de las estructuras, geometría y formas, éstas se agruparon espacialmente con el objetivo de optimizar la campaña de exploración.

En el Anexo 1 se presenta la localización de los puntos de exploración del subsuelo ejecutados para la ingeniería de detalle de la Fase I de la PTAR Canoas. De igual forma se presenta la localización de los grupos de estructuras de la Tabla 3-1. A continuación se presentan las actividades de campo ejecutadas.

3.4.1.1 Perforaciones mecánicas en área de proyección de estructuras

Las perforaciones mecánicas fueron realizadas por LOGAN DRILLING COLOMBIA S.A.S, entre el 23 de enero y el 15 de abril de 2015 bajo supervisión de ingenieros de campo de CDM Smith quienes controlaron los estándares de calidad solicitados al subcontratista. Las perforaciones fueron ejecutadas a profundidades entre 10,0 y 58,5 m por debajo de la superficie del terreno empleando los equipos de perforación mecánica DL800 (2 equipos) y DL600 (1 equipo), ver Figura 3-2. La frecuencia de recuperación de muestras para ensayar en el laboratorio correspondió a la presentada en la Figura 3-3 y la Figura 3-4. Cabe mencionar que en todas las perforaciones se obtuvo el perfil estratigráfico completo de suelo explorado, pues el avance entre muestras recuperadas (SPT o Shelby) se realizó con barrena que perfora el material y permite el examen visual del material explorado.

En suelos finos blandos (limos, arcillas y turbas), se obtuvieron muestras inalteradas con tubo de pared delgada¹, donde la consistencia del material permitió la obtención siguiendo el procedimientos propuesto por la norma I.N.V.E. 105-07 (Obtención de muestras para probetas de ensayos mediante tubos de pared delgada), mientras que en suelos granulares y finos competentes se tomaron muestras alteradas con el muestreador de cuchara partida siguiendo la I.N.V.E. 111-07 (Ensayo de penetración normal (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido).

También se realizaron ensayos de veleta de campo de acuerdo con la norma I.N.V.E. 170-07 Ensayo de corte sobre suelos cohesivos en el terreno usando veleta y se tomaron lecturas de penetrómetro de bolsillo sobre las muestras inalteradas.

Las muestras recuperadas con tubo de pared delgada se dejaron dentro del tubo, se identificaron, se sellaron con papel vinipel para conservar la humedad del material. Los tubos contenedores de muestras se organizaron en cajas de madera y se separaron con icopor para mitigar la alteración durante el transporte hasta las instalaciones del laboratorio (Ver Figura 3-5). Una vez las muestras fueron recibidas por el laboratorio, se extrajeron con un pistón hidráulico, para luego tomar un registro fotográfico de las muestras extraídas sobre un tablero acrílico, en el cual se hizo la descripción de la muestra y la respectiva identificación por parte del personal del laboratorio.

Después de la toma del registro fotográfico la muestra se protegió con papel vinipel y se almacenó en el cuarto húmedo de laboratorio para luego ser sometida a los ensayos programados por el ingeniero geotecnista de CDM Smith.

¹ Se define tubo de pared delgada aquel cuya relación de área, $R_a < 15\%$

Figura 3-2 Equipos de perforación empleado DL800.



Figura 3-3 Frecuencia de muestreo – Recuperación de una muestra en 1,0 m de perforación

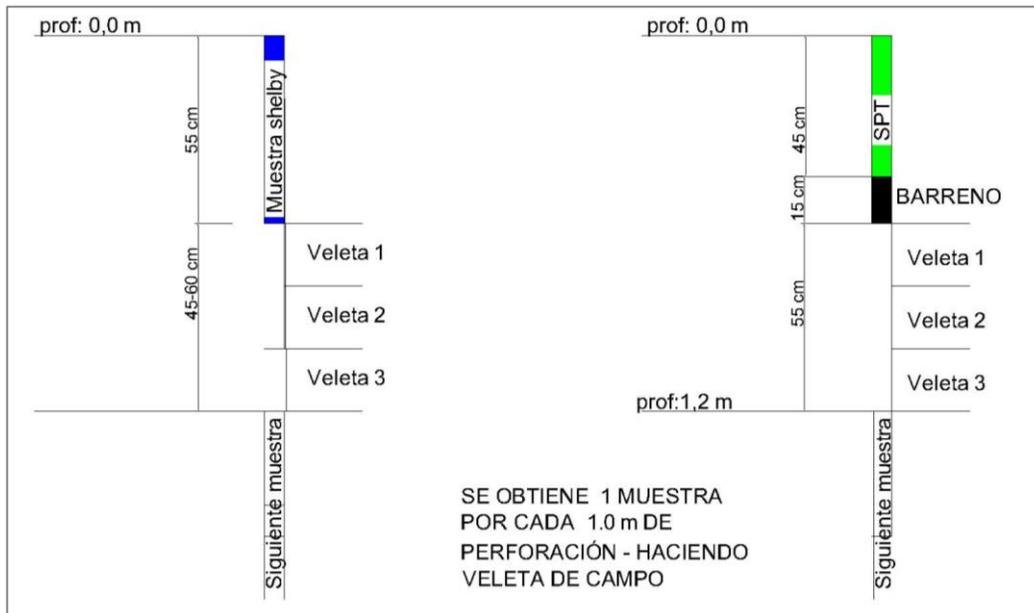


Figura 3-4 Frecuencia de muestreo - Recuperación de una muestra en 1,5 m de perforación

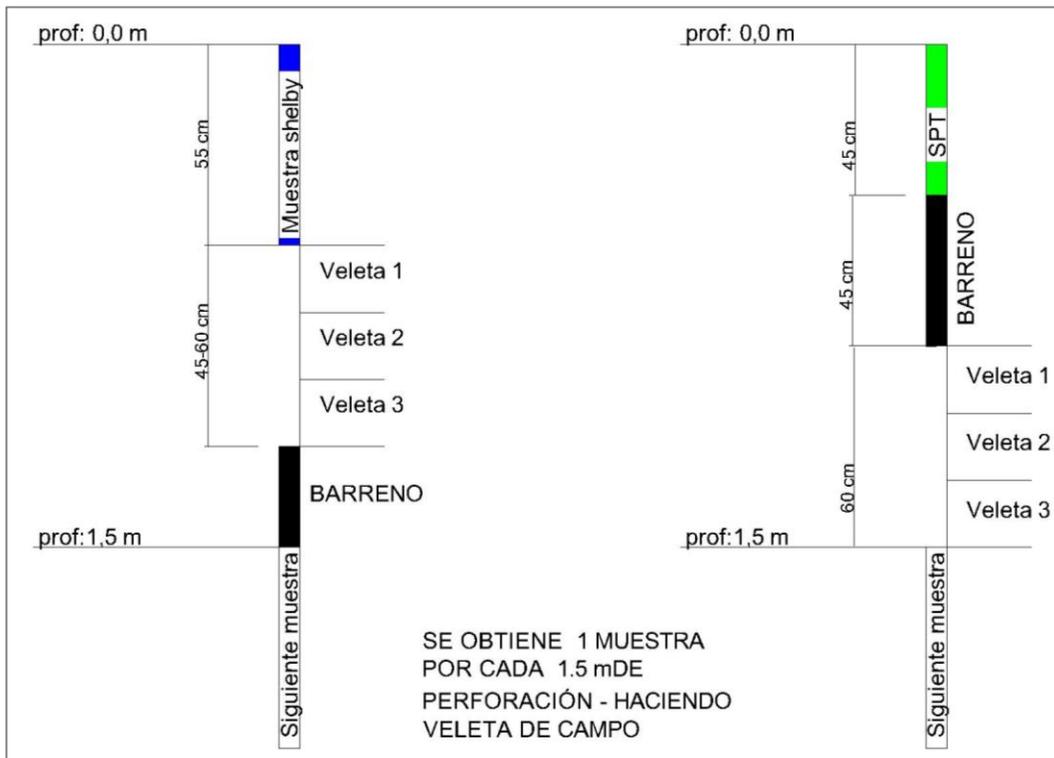


Figura 3-5 Almacenamiento de muestras inalteradas y alteradas en cajas de madera



En total se perforaron 1.289,15 metros, de los cuales 1.260,70 m fueron perforados en suelo y 28,45 m en roca como se presenta en la Tabla 3-2. En total se recuperaron 1.116 muestras de las cuales 938

fueron obtenidas con tubo de pared delgada (muestras inalteradas) y 153 muestras con muestreador de cuchara partida o SPT (muestras alteradas).

El Anexo 2 presenta los resúmenes gráficos de las propiedades del suelo obtenidas tanto en campo como en ensayos de laboratorio. El Anexo 3 contiene el perfil estratigráfico generado a partir de fotografías tomadas tanto en campo (muestras SPT) como en laboratorio (muestras inalteradas extraídas en laboratorio), descripción del material e identificación de las mismas.

En la Tabla 3-3 se presenta discriminado el número de muestras inalteradas y las alteradas obtenidas en cada perforación.

Tabla 3-2 Coordenadas, profundidades totales, metros de perforación en suelo y metros de perforación en roca.

Perforación	Coordenadas		Cota (m.s.n.m)	Profundidad total (m)	Perforación en suelo (m)	Perforación en roca (m)
	Este	Norte				
PF-1	80.072,62	96.880,22	2.551,38	30	30	0
PF-2	80.144,28	96.809,83	2.551,03	30	30	0
PF-3	80.072,78	96.808,69	2.552,35	20	20	0
PF-4	80.001,53	96.811,18	2.552,95	30	30	0
PF-5	80.101,22	96.727,93	2.551,57	30	30	0
PF-7	80.039,33	96.727,93	2.552,48	30	30	0
PF-8	80.162,58	96.696,47	2.551,6	50,25	50,25	0
PF-9	80.175,92	96.572,74	2.551,82	40	40	0
PF-10	80.176,68	96.448,17	2.551,28	50	50	0
PF-11	80.072,78	96.697,87	2.552,11	58,5	52,0	6,5
PF-12	80.072,70	96.573,21	2.552,69	52	49,18	2,82
PF-13	80.073,12	96.447,09	2.552,76	40	40	0
PF-14	79.978,82	96.695,47	2.553,6	50	42,3	7,7
PF-15	79.971,39	96.572,74	2.553,4	40	38,5	1,5
PF-16	79.970,98	96.450,20	2.554	50,45	50,45	0
PF-18	80.147,68	96.347,55	2.551,99	30	30	0
PF-19	80.087,28	96.347,55	2.552,5	30	30	0
PF-20	80.060,47	96.367,51	2.552,8	15	15	0
PF-21	80.112,96	96.302,05	2.552,21	50	50	0
PF-22	80.108,11	96.188,78	2.552,38	51,5	44,8	6,7
PF-23	80.056,12	96.302,05	2.553,06	50	49	1
PF-24	80.056,97	96.188,78	2.553,54	51	49,5	1,5
PF-25	79.973,50	96.385,22	2.554,55	15	15	0
PF-26	79.952,60	96.258,10	2.555,73	15	15	0
PF-27	79.934,38	96.341,36	2.555,37	15	15	0
PF-28	80.209,78	96.321,96	2.551,58	15	15	0
PF-29	80.149,72	96.301,84	2.551,96	15	15	0
PF-30	80.186,46	96.246,82	2.551,83	15	15	0
PF-31	80.217,88	96.187,35	2.551,07	15	15	0

Perforación	Coordenadas		Cota (m.s.n.m)	Profundidad total (m)	Perforación en suelo (m)	Perforación en roca (m)
	Este	Norte				
PF-32	80.146,56	96.239,78	2.552,01	15	15	0
PF-33	80.155,44	96.183,61	2.552,02	15	15	0
PF-34	80.154,14	96.080,80	2.551,56	15	15	0
PF-35	80.059,50	96.117,13	2.553,3	15	15	0
PF-36	80.059,50	96.068,82	2.553,53	15	15	0
PF-37	80.100,86	96.012,44	2.551,87	15	15	0
PF-38	80.031,11	96.014,04	2.553,57	15	15	0
PF-39	79.995,33	96.050,66	2.554,5	15	15	0
PF-40	79.995,16	96.146,87	2.555,48	15	15	0
PF-41	79.922,15	96.069,09	2.557,53	15	15	0
PF-42	79.991,67	96.881,75	2.552,75	15	15	0
PF-43	79.928,54	96.742,04	2.553,68	15	15	0
PF-44	79.922,39	96.625,16	2.554,04	15	15	0
PF-45	79.926,48	96.431,71	2.554,55	15	15	0
PF-46	80.026,20	96.421,99	2.553,67	15	15	0
PF-47	80.200,38	95.989,61	2.549,6	15	15	0
PF-48	80.200,33	95.850,78	2.551,07	15	15	0
PF-49	80.215,15	95.729,19	2.547,73	14,95	14,95	0
PF-50	80.291,57	95.400,63	2.539,54	15	15	0
PF-52	80.212,60	96.616,08	2.551,14	10	10	0
PF-53	80.212,60	96.791,20	2.549,25	10	10	0

Tabla 3-3 Número de muestras inalteradas y alteradas obtenidas en perforaciones mecánicas.

Perforación	N° Total muestras	N° Inalterada	N° alteradas
PF-1	28	28	0
PF-2	31	31	0
PF-3	14	14	0
PF-4	28	28	0
PF-5	31	27	4
PF-7	27	28	0
PF-8	48	27	0
PF-9	28	36	12
PF-10	52	26	2
PF-11	35	42	10
PF-12	48	28	7
PF-13	28	29	19
PF-14	41	22	6
PF-15	27	30	11

Perforación	N° Total muestras	N° Inalterada	N° alteradas
PF-16	53	22	5
PF-18	30	30	0
PF-19	27	27	0
PF-20	11	11	0
PF-21	53	36	17
PF-22	43	31	12
PF-23	48	31	17
PF-24	48	29	19
PF-25	11	11	0
PF-26	14	14	0
PF-27	11	11	0
PF-28	16	16	0
PF-29	11	11	0
PF-30	11	11	0
PF-31	11	11	0
PF-32	11	11	0
PF-33	11	11	0
PF-34	16	16	0
PF-35	11	11	0
PF-36	14	14	0
PF-37	12	10	2
PF-38	11	11	0
PF-39	11	11	0
PF-40	11	11	0
PF-41	14	14	0
PF-42	11	11	0
PF-43	14	14	0
PF-44	11	9	2
PF-45	14	13	1
PF-46	11	11	0
PF-47	17	14	3
PF-48	12	11	1
PF-49	13	13	0
PF-50	11	8	3
PF-52	8	8	0
PF-53	8	8	0

3.4.1.2 Perforaciones mecánicas sobre el lecho del río Bogotá

Con el fin de estudiar y modelar la interacción entre el río Bogotá, la estructuras de entrega del caudal de la PTAR Canoas al río Bogotá y su área de influencia, se realizó la exploración geotécnica sobre el lecho del río Bogotá a la altura del punto de entrega de la PTAR Canoas, aguas arriba y aguas abajo. En esta zona se ejecutaron en total 25 perforaciones con el método de a percusión y lavado, obteniendo muestras cada 1,5 m. En la Tabla 3-4 se presentan las coordenadas, cotas y profundidades de las perforaciones ejecutadas sobre el lecho del río.

En los trabajos de campo de topografía para el Producto (volumen 2 del presente producto), se realizaron 32 secciones topobatemétricas aguas arriba y aguas debajo de la estructura de entrega de la PTAR. Sobre 8 secciones de estas se realizaron 2 perforaciones por sección. La identificación de estas perforaciones obedece a la sección en la cual se realizó la perforación y el número de perforación.

Tabla 3-4 Coordenadas, profundidades totales, metros de perforación sobre el lecho del río

Perforación	Coordenadas		Cota (m.s.n.m)	Profundidad total (m)
	Este	Norte		
S1-PF1	9.5321,55	81.152,17	2.535,26	7,5
S1-PF2	9.5344,63	81.152,83	2.536,91	7,0
S2-PF1	9.5348,30	80.916,46	2.538,94	7,0
S2-PF2	9.5366,08	80.926,80	2.534,01	5,0
S4-PF1	9.5675,74	80.144,02	2.534,86	6,0
S4-PF2	9.5688,57	80.478,75	2.538,98	7,0
S6-PF1	9.5633,47	80.550,82	2.539,24	7,5
S6-PF2	9.5651,10	80.548,94	2.535,64	8,0
S7-PF1	9.5641,34	80.421,80	2.534,40	5,0
S7-PF2	9.5667,73	80.410,15	2.534,40	7,5
S8-PF1	9.5593,25	80.363,78	2.539,16	7,5
S8-PF2	9.5606,17	80.555,79	2.534,46	5,0
S11-PF1	9.5603,25	80.331,85	2.535,64	6,5
S11-PF2	9.5613,98	80.321,95	2.534,15	8,0
S28-PF1	9.5399,48	80.291,69	2.539,28	5,0
S28-PF2	9.5430,78	80.284,62	2.536,42	6,5

3.4.1.3 Sondeos con CPTu (Cone Penetration Test-undrained)

Además de las perforaciones mecánicas, se realizaron quince (15) sondeos con el piezocono, obteniendo registros de resistencia por punta, resistencia en el fuste y presión de poros con una frecuencia de cada 2 cm de profundidad. La localización de los sondeos CPTu se definió intercalando estos sondeos con perforaciones mecánicas, con el objetivo de complementar el perfil de caracterización para la ingeniería de detalle.

Los trabajos de sondeos CPTu fueron ejecutados por la empresa INGENIERIA Y GEORIESGOS S.A.S, la supervisión de los trabajos se realizó por parte de ingenieros de campo de CDM Smith – INGESAM. Los trabajos se ejecutaron de acuerdo a las pautas dadas *ASTM D 5779 – 07 Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of soil*. El Anexo 4 (Informe de actividades de campo, registros y análisis de ensayos de campo) contiene los datos obtenidos en campo y la respectiva

interpretación para la obtención de parámetros geotécnicos (Peso unitario, ángulo de fricción, cohesión, módulo de Young, módulo confinado, relación de sobreconsolidación, etc.) empleando el software CPTeT-It (Cone penetration test software). La localización y profundidades de los sondeos CPTu se presentan en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5 Coordenadas, profundidades totales de sondeos CPTu.

Sondeo	Coordenadas		Cota (m.s.n.m)	Profundidad total (m)
	Este	Norte		
CPTu-1	80.183,03	96942,77	2549,78	44,42
CPTu-2	80.019,93	96852,70	2552,52	20,36
CPTu-3	80.114,93	96811,56	2551,85	20,62
CPTu-4	80.143,23	96642,95	2551,96	40,02
CPTu-5	80.003,71	96642,97	2553,39	30,04
CPTu-6	80.073,28	96502,42	2552,79	40,3
CPTu-7	80.147,58	96388,05	2551,71	30,22
CPTu-8	80.117,48	96347,55	2552,03	30,22
CPTu-9	80.108,11	96245,56	2552,15	36,72
CPTu-10	79.973,60	96336,75	2555,08	15,24
CPTu-11	80.217,99	96102,27	2551,22	15,46
CPTu-12	80.099,88	96081,25	2552,46	15,26
CPTu-13	80.009,86	96222,74	2554,52	15,22
CPTu-14	79.995,16	96101,44	2555,23	15,32
CPTu-15	80.256,65	95555,24	2535,03	20,34

3.4.1.4 Sondeos con DMT (Dilatometer Marchetti Test)

La campaña de exploración contempló la ejecución de siete (7) ensayos con Dilatómetro plano de Marchetti con lecturas cada 20 cm de profundidad. Los sondeos con DMT fueron ejecutados por la empresa INGENIERIA Y GEORIEGOS S.A.S de acuerdo con la norma ASTM D6635 y bajo supervisión de ingenieros de campo de CDM Smith – INGESAM.

La localización y profundidad de los sondeos ejecutados en el Producto 7 se presenta en la Tabla 3-6

Tabla 3-6 Coordenadas, profundidades totales de sondeos DMT.

Sondeo	Coordenadas		Cota (m.s.n.m)	Profundidad total (m)
	Este	Norte		
DMT-20	80119,89	96852,9	2550,79	20,4
DMT-21	80027,79	96811,18	2552,72	20,4
DMT-22	80072,67	96636,15	2552,31	31,6
DMT-23	79990,68	96501,83	2553,64	38,8
DMT-24	80141,98	96501,83	2551,96	40,4
DMT-25	80087,28	96388,05	2552,52	30,4
DMT-26	80057,43	96245,42	2551,53	24

3.4.1.5 Pruebas de disipación de presión de poros

En total se ejecutaron quince (15) pruebas de disipación de presión de poros con el equipo de CPTu. Este ensayo consiste en detener el sensor a una profundidad determinada y registrar la disipación del exceso de presión de poros hasta alcanzar el equilibrio, obteniendo así una curva de consolidación que representa la disipación de presión de poros en el tiempo transcurrido para alcanzar el equilibrio.

La localización de las pruebas de disipación de presión de poros se presenta en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7 Coordenadas, profundidades de pruebas de disipación de presión de poros.

Sondeo	Coordenadas		Cota (m.s.n.m)	Profundidad de la prueba (m)
	Este	Norte		
CPTu-1	80.183,03	96942,77	2549,78	13,68 - 24,95
CPTu-2	80.019,93	96852,70	2552,52	10,07
CPTu-3	80.114,93	96811,56	2551,85	No se ejecuta porque no se genera la suficiente exceso de presión de poros
CPTu-4	80.143,23	96642,95	2551,96	20,03 - 39,98
CPTu-5	80.003,71	96642,97	2553,39	27,32
CPTu-6	80.073,28	96502,42	2552,79	18,94
CPTu-7	80.147,58	96388,05	2551,71	28,98
CPTu-8	80.117,48	96347,55	2552,03	19,94
CPTu-9	80.108,11	96245,56	2552,15	29,16
CPTu-10	79.973,60	96336,75	2555,08	No se ejecuta porque no se genera la suficiente exceso de presión de poros
CPTu-11	80.217,99	96102,27	2551,22	9,86
CPTu-12	80.099,88	96081,25	2552,46	9,92
CPTu-13	80.009,86	96222,74	2554,52	14,58
CPTu-14	79.995,16	96101,44	2555,23	9,12
CPTu-15	80.256,65	95555,24	2535,03	9,39

3.4.1.6 Ensayos Down Hole

Se realizaron 6 ensayos Down Hole, empleando las perforaciones ejecutadas. Este ensayo consiste en la generación de ondas inducida por una fuente sísmica sobre una placa en superficie, ubicada entre 1 y 3 m del centro de la perforación adecuada para el ensayo (revestidas con tubería PVC y rellenando el espacio anular entre la pared de la perforación y el tubo con mortero). La localización y profundidad de los ensayos Down Hole se presentan en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8 Coordenadas y profundidades totales de ensayos Down Hole

Down Hole	Coordenadas		Cota (m.s.n.m)	Profundidad (m)
	Este	Norte		
PF-1	80.072,62	96.880,22	2.551,38	29,5
PF-5	80.101,22	96.727,93	2.551,57	29,5
PF-9	80.175,92	96.572,74	2.551,82	30,0
PF-15	79.971,39	96.572,74	2.553,4	28,6
PF-19	80.087,28	96.347,55	2.552,5	19,6
PF-22	80.108,11	96.188,78	2.552,38	29,0

El Anexo 4 (Actividades de campo, registro y análisis de ensayos de campo) contiene el informe y los resultados de los ensayos Down Hole realizados en los diferentes puntos.

3.4.1.7 Piezómetros de tubo abierto y Casagrande

De las cincuenta y una (51) perforaciones ejecutadas, catorce (14) se emplearon para la instalación de piezómetros temporales con profundidades entre 15 y 20 m, 10 piezómetros de tubo abierto (9º pozos de observación) y 4 piezómetros tipo Casagrande. Los niveles de agua registrados por la Consultoría se analizan en la Sección 8 del presente informe.

La localización y profundidad de instalación de los piezómetros se presentan en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9 Localización de ensayos Piezómetros instalados

Piezómetro	Coordenadas		Cota (m.s.n.m)	Profundidad total (m)	Tubo abierto	Casagrande
	Este	Norte				
PF-2	80.144,28	96.809,83	2.551,03	18,6	X	
PF-4	80.001,53	96.811,18	2.552,95	20,9	X	
PF-8	80.162,58	96.696,47	2.551,6	19,3	X	
PF-10	80.176,68	96.448,17	2.551,28	20,4	X	
PF-11	80.072,78	96.697,87	2.552,11	15,68		X
PF-12	80.072,70	96.573,21	2.552,69	15,2		X
PF-13	80.073,12	96.447,09	2.552,76	16,57		X
PF-14	79.978,82	96.695,47	2.553,6	21,24	X	
PF-16	79.970,98	96.450,20	2.554	19,58	X	
PF-18	80.147,68	96.347,55	2.551,99	19,55	X	
PF-23	80.056,12	96.302,05	2.553,06	15,45		X
PF-24	80.056,97	96.188,78	2.553,54	19,93	X	
PF-26	79.952,60	96.258,10	2.555,73	15,29	X	
PF-31	80.217,88	96.187,35	2.551,07	14,4	x	

3.4.1.8 Supervisión y acompañamiento técnico de los trabajos de campo

Durante el desarrollo de todas las actividades ejecutadas en campo el grupo de supervisores de campo de CDM Smith – INGESAM garantizaron que los subcontratistas dieran cumplimiento a los términos de referencia de la contratación y la normatividad técnica vigente para la ejecución de los diferentes puntos de exploración.

3.4.1.9 Programa de ensayos de laboratorio

Con el objetivo de realizar una caracterización física y mecánica de las capas de suelo exploradas, se diseñó un programa de ensayos de laboratorio ajustado al tipo de suelo y condiciones de diseño bajo las cuales se deben evaluar las diferentes estructuras y obras que componen la Fase I de la PTAR Canoas.

El laboratorio contratado para la ejecución del programa de ensayos fue la empresa SUELOS Y PAVIMENTOS GREGORIO ROJAS & CIA. Laboratorio que cuenta con ensayos con certificación

Organización Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC) y vasta experiencia en ensayos sobre los tipos de suelos muestreados.

La Tabla 3-10 presenta el tipo de ensayos y cantidades programadas que hacen parte del análisis de la caracterización geotécnica preliminar de detalle presentada en la sección 4 del presente informe.

Tabla 3-10 Programa de ensayos de laboratorio y cantidad ensayos ejecutados y analizados

Ensayo	Cantidad Programado
Contenido de humedad	381
Límites de Atterberg	516
Compresión inconfínada	153
Compresión cíclica	42
Peso unitario parafinado	262
Peso específico de sólidos	165
Granulometría con lavado muestras pequeñas	0
Lavado sobre tamiz No. 200	214
Granulometría por hidrómetro	85
Resistencia con veleta	191
Consolidación unidimensional lenta	65
Consolidación unidimensional rápida	89
Expansión en consolidómetro	76
Contenido de materia orgánica por calcinación	177
Determinación del PH, ORP, conductividad y salinidad	60
Compresión triaxial cíclica TC	3
Columna resonante	2
Compresión triaxial CU estándar	34
Compresión triaxial CU con descarga	20
Compresión triaxial CD	0
Módulo resiliente	12
Extracción de tubos Shelby	941

Los resultados de los ensayos de laboratorio ejecutados se presentan en el Anexo 5.

Sección 4

Condiciones geológicas

Como parte del alcance de los trabajos de campo para la ingeniería preliminar de la PTAR Canoas, se presentó en el Producto 2 (Trabajos de campo preliminares, sección 4) la geología regional y local de la zona destinada para la PTAR Canoas. Sin embargo, dado el nivel de detalle de la exploración del subsuelo realizada en el Producto 7, se complementó la caracterización geológica de la zona, la cual se presenta a continuación.

Como se comentó en el informe del Producto 2: “Según las cartografías geológicas en este sector sur occidental de la cuenca de la Sabana de Bogotá, en la región entre los municipios de Soacha y Sibaté, las unidades del Paleógeno y del Neógeno, por encima de la formación Guaduas no afloran, posiblemente se encuentran cubiertas en la zona, bajo sedimentos cuaternarios de tipo aluvial y lagunar, como las formaciones Sabana y Chía.”

En las 53 perforaciones realizadas en la fase de la exploración del subsuelo para ingeniería de detalle se presentan cuerpos litológicos ya descritos en la primera fase de exploración, llamando la atención desde la óptica estratigráfica algunos núcleos recuperados, que muestran detalles los cuales no se habían reportado anteriormente.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la perforación 14, donde se aprecian núcleos recuperados después de los 42 metros de profundidad de arenitas de grano fino a muy fino, con matriz lodosa, de color amarillo, bioperturbadas, fracturadas, con niveles delgados de brechas sedimentarias compuestas por fragmentos de formas rectangulares de la Formación Plaeners del Grupo Guadalupe y con presencia de estructuras biogénicas sedimentarias como rodolitos.

Este hallazgo litológico sugiere una unidad cuya posición estratigráfica estaría por encima de la Formación Guaduas y por debajo de las Formaciones Chía y Sabana, y podría corresponder al rango espacio temporal de edad Paleoceno – Eoceno, en los que se encuentran la Formación Cacho y de la Formación Bogotá.

Figura 4-1 Perforación PF-14. Detalles de núcleos de roca biogénicas como algas fósiles y rodolitos.



Figura 4-2 Perforación PF-14. Detalles de núcleos de roca biogénicas como algas fósiles y rodolitos.



A continuación se presentan las características estratigráficas relevantes de estas dos unidades

4.1 Formación Cacho (E1C).

Esta unidad fue descrita originalmente por Hubach, (1931) denominándolo como el conjunto inferior en el piso Bogotá, Julivert en 1963 ya utiliza formalmente el nombre de Formación Cacho.

- Sección Tipo.

Se adopta la columna de la vereda la Carbonera, en el municipio de Guatavita, Cundinamarca.

- Litología.

Sucesión capas muy gruesas cuneiformes a sutabulares de areniscas de grano fino a medio, mal seleccionada y friables, separadas por niveles delgados de arcillolitas grises.

- Espesor.

Se presenta en un intervalo cuyo espesor es de 172,6 m.

- Características Especiales.

Su morfología general característica está dada por un relieve montañoso y colinado.

- Edad.

Pleoceno inferior y superior.

4.2 Formación Bogotá (E1-2b).

En 1931 Hubach, utiliza por primera vez el término piso de Bogotá, para esta secuencia del terciario medio, Julivert en 1963 determina la localidad tipo y define los límites para la Formación Bogotá.

- Sección Tipo.

Se ubica en la quebrada o Grande en el flanco occidental del Sinclinal de Usme.

- Litología.

Conjunto de areniscas en capas granodecrecientes friables con interposiciones de arcillolitas y limolitas de color gris violeta.

- Espesor.

En la quebrada el Mochuelo dentro del Sinclinal de Usme, se registran 1.095 m.

- Características Especiales.

Su relieve es bajo y ondulado, con geoformas suaves

- Edad.

Paleoceno superior – Eoceno inferior.

Sección 5

Caracterización geotécnica detallada del sitio

En esta sección se presentan gráficas de la variación de las propiedades índice, mecánicas y de compresibilidad obtenidas mediante ensayos de campo (sondeos CPTu, DMT) y ensayos de laboratorio. A partir del análisis general de los resultados se presenta la metodología para asignar las propiedades a emplear en el diseño detallado, esta metodología se aplica por zonas de estructuras para el Producto 7, y se utilizará por estructuras en la ingeniería de detalle (Producto 9, 10 y 11).

Basados en la descripción de las muestras, ensayos de campo, empleando los perfiles de propiedades del suelo e interpretando la variabilidad espacial de las mismas, se definieron doce perfiles estratigráficos.

5.1 Propiedades índice y mecánicas del suelo

A continuación se presentan las propiedades del suelo obtenidas en toda el área de la Fase I y su variación en profundidad, propiedades obtenidas en ensayos de laboratorio, ensayos de campo, CPTu y DMT.

5.1.1 Contenido de humedad natural y límites de Atterberg

En la Figura 5-1 se presenta la variación del contenido de humedad y límites de Atterberg en profundidad en toda el área de la Fase I de la PTAR Canoas.

En general se observa que entre la cota 2555 y la cota 2535 el límite plástico varía entre 20 y 40%, el límite el contenido de humedad natural entre 20 y 100% y el límite líquido varía entre 50 y 140%. En este rango existen valores de humedad natural muy cercanos al límite plástico. Entre las cotas 2535 y la cota 2518 se presentan valores de límite de plasticidad entre 20 hasta 200%, contenidos de humedad natural entre 20 y 220% y valores de límite líquido entre 40 hasta 300%. Se observa que cerca del 40% de las muestras entre las cotas 2535 y 2518 tienen límites plásticos superiores a 70% y el contenido de humedad natural es muy cercano al límite líquido, relacionando estos materiales con comportamiento de alta compresibilidad (OH o MH). Por último entre las cotas 2518 y la 2500 los límites de plasticidad varían entre 20 y 40%, el contenido de humedad natural entre 20 y 60% y el límite líquido entre 40 y 90%.

En la Figura 5-2 se presenta la carta de plasticidad de los materiales finos explorados en la Fase I de la PTAR Canoas. Se observan que los materiales explorados son arcillas de alta y baja plasticidad, y limos orgánicos de alta compresibilidad. Cabe mencionar que los materiales analizados en la carta de plasticidad corresponden a materiales finos.

Figura 5-1 Variación del contenido de humedad natural y Límites de Atterberg

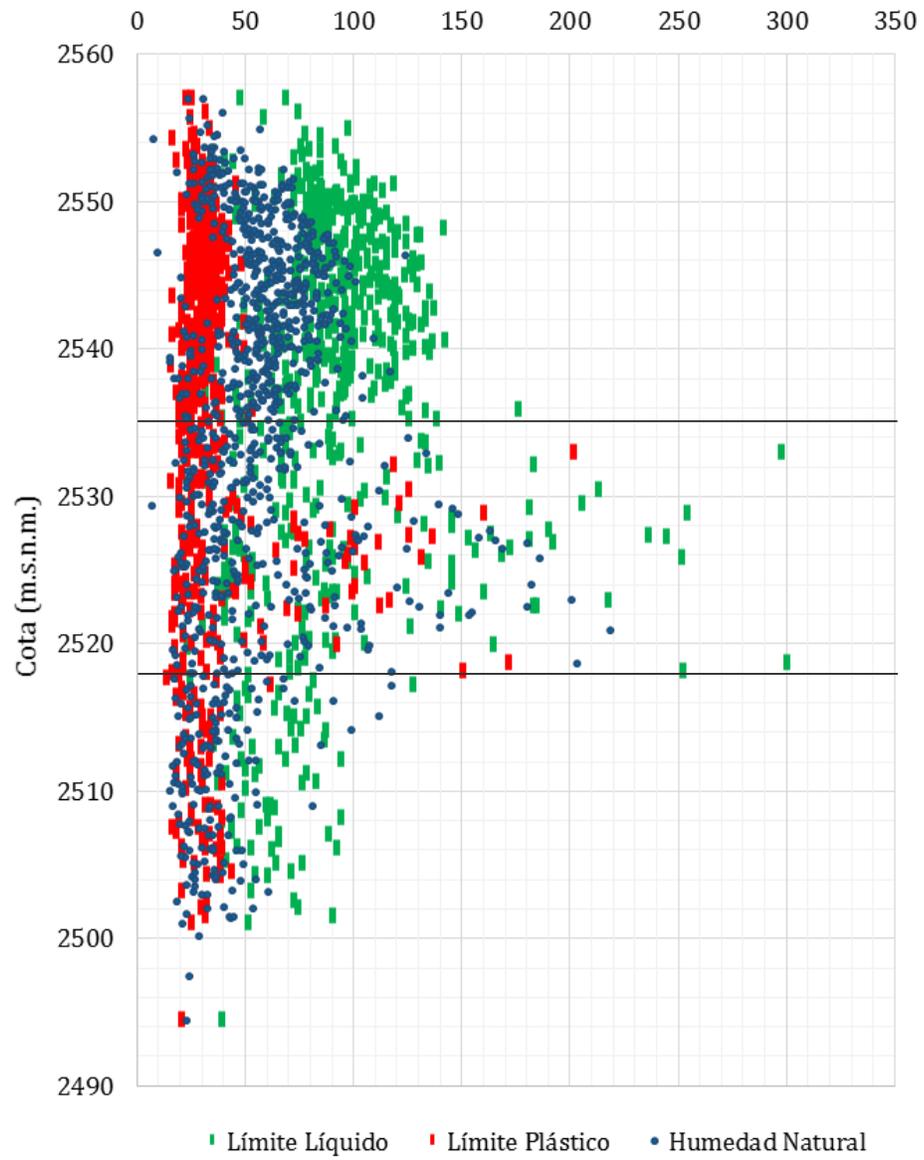
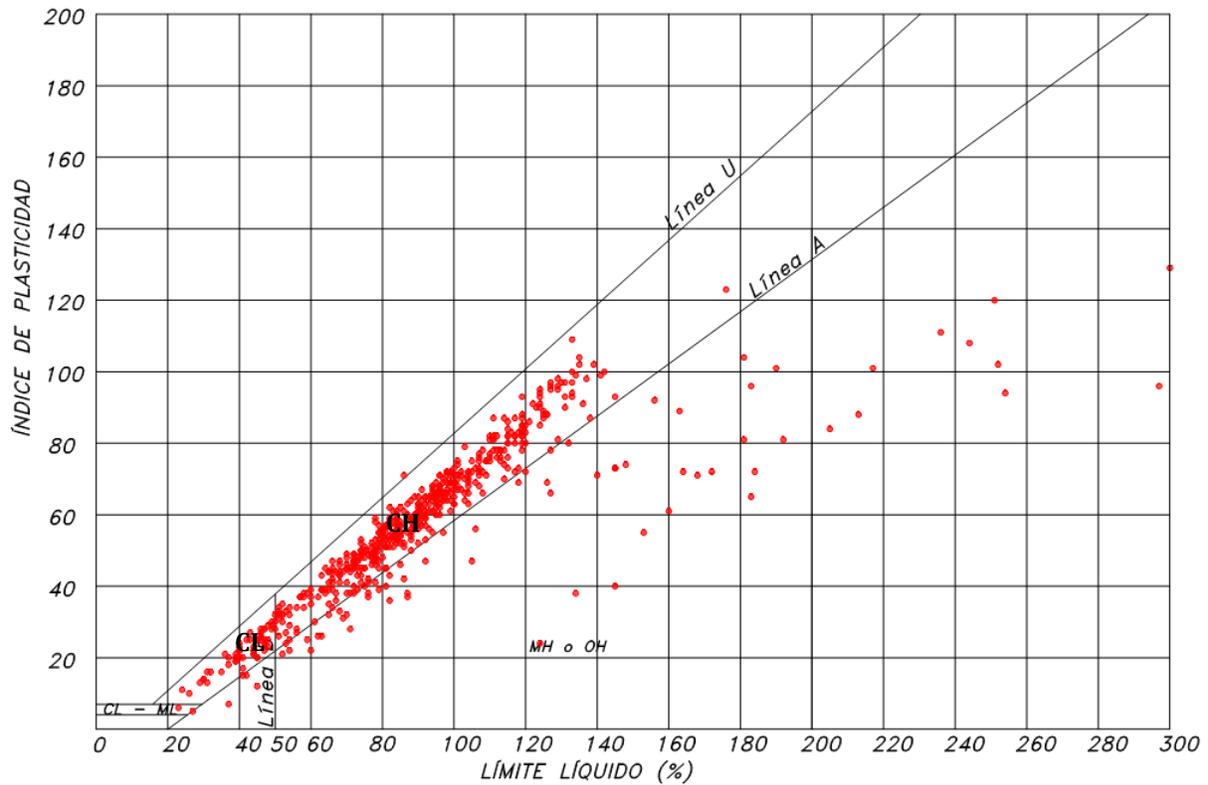


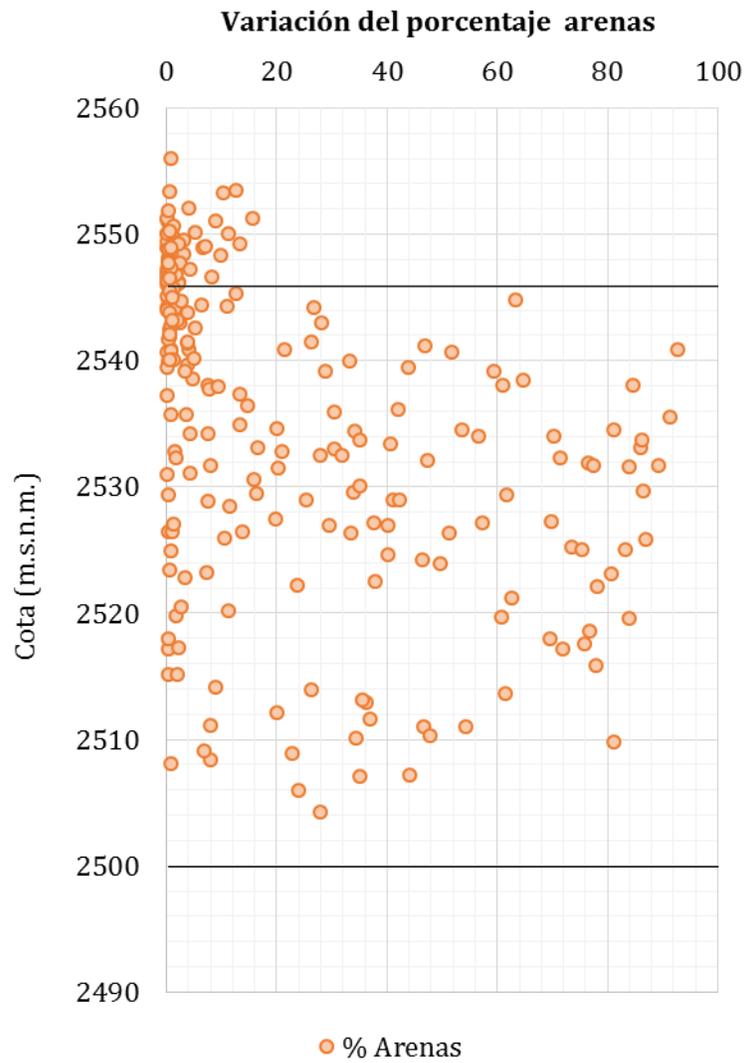
Figura 5-2 Carta de plasticidad de Casagrande – PTAR CANOAS FASE I



5.1.2 Contenido de arenas

En la exploración e identificación de muestras se observó que el perfil se caracteriza por estar compuesto por material arcilloso y limoso, que no existen materiales gravosos, pero sí se evidencian lentes de arenas en las muestras obtenidas. En la Figura 5-3 se observa que desde la cota 2555 a la 2545 el contenido de arenas varía entre el 0,2 y 20% y entre las cotas 2545 y la 2505 hay una amplia variación entre 0,2 y 90%.

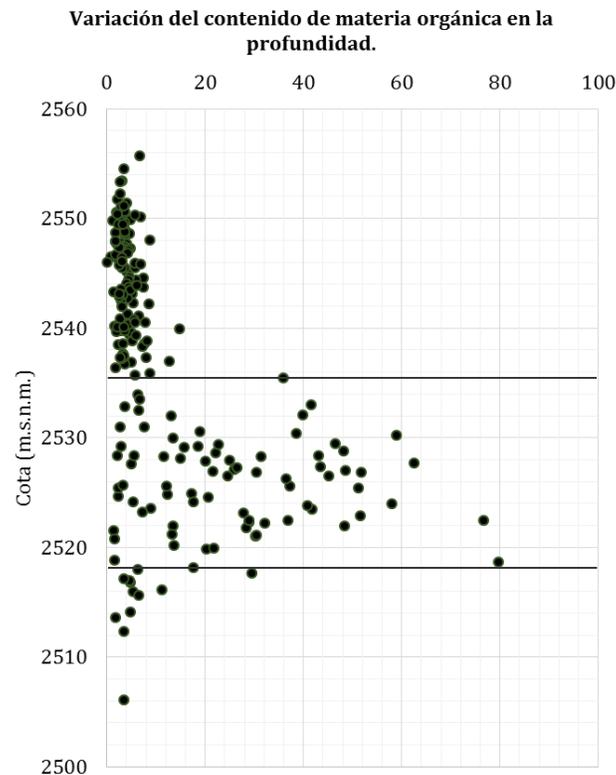
Figura 5-3 Variación del contenido de finos en profundidad



5.1.3 Contenido de materia orgánica

En la Figura 5-4 se presenta la variación del contenido de materia orgánica en toda el área de la PTAR CANOAS. Estos ensayos se realizaron sobre materiales en los que se observó contenido de materia orgánica. En general se observa que entre las cotas 2555 y la 2535 los contenidos de materia orgánica varían entre el 5 y 15%. Mientras que entre las cotas 2535 y la 2518 el contenido de materia orgánica varía entre 5 y 80%. Evidentemente esto confirma la presencia de limo orgánico definido con la carta de plasticidad de Casagrande. Por último entre las cotas 2518 y 2505 los valores varían entre 5 y 10%.

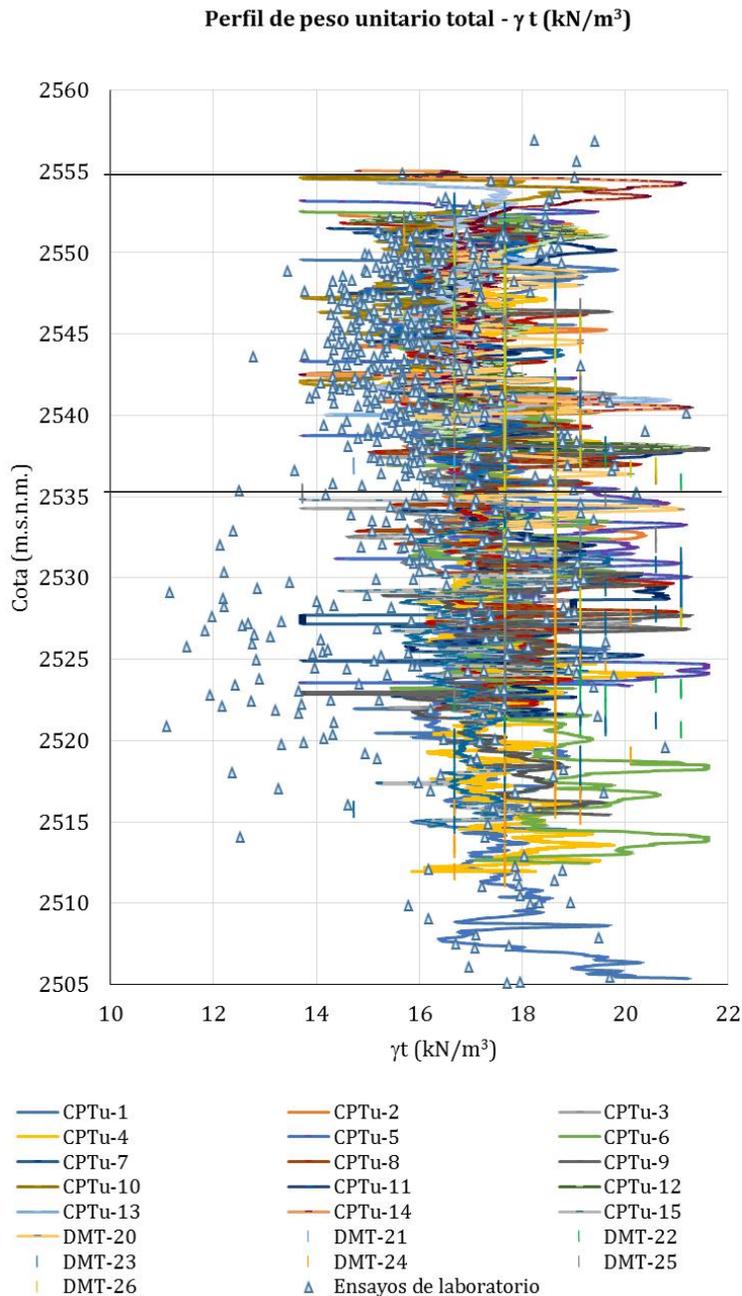
Figura 5-4 Variación del contenido de materia orgánica en profundidad



5.1.4 Peso Unitario total

En la Figura 5-5 se presenta la variación del peso unitario obtenido mediante ensayos de laboratorio y ensayos in situ. En general se observa que entre la cota 2555 y la cota 2535 hay similitud entre las magnitudes de peso unitario obtenidos en toda el área de la Fase I. Estos valores se encuentran entre los 14 y 19 kN/m³. Mientras que de la cota 2535 a la cota 2515 se presenta dispersión entre los datos obtenidos en ensayos de laboratorio y los obtenidos en los ensayos de campo. Los valores de mayor desviación o menores a los obtenidos con ensayos in situ, corresponden a materiales livianos como limos orgánicos (valores entre 11 y 13,5 kN/m³), por otro lado los valores con menor dispersión mantienen el rango de valores entre los 14 y 19 kN/m³. Por último entre la cota 2515 y la 2505 el peso unitario total varía entre 17 y 20 kN/m³.

Figura 5-5. Variación del peso unitario en profundidad en toda el área de la Fase I.



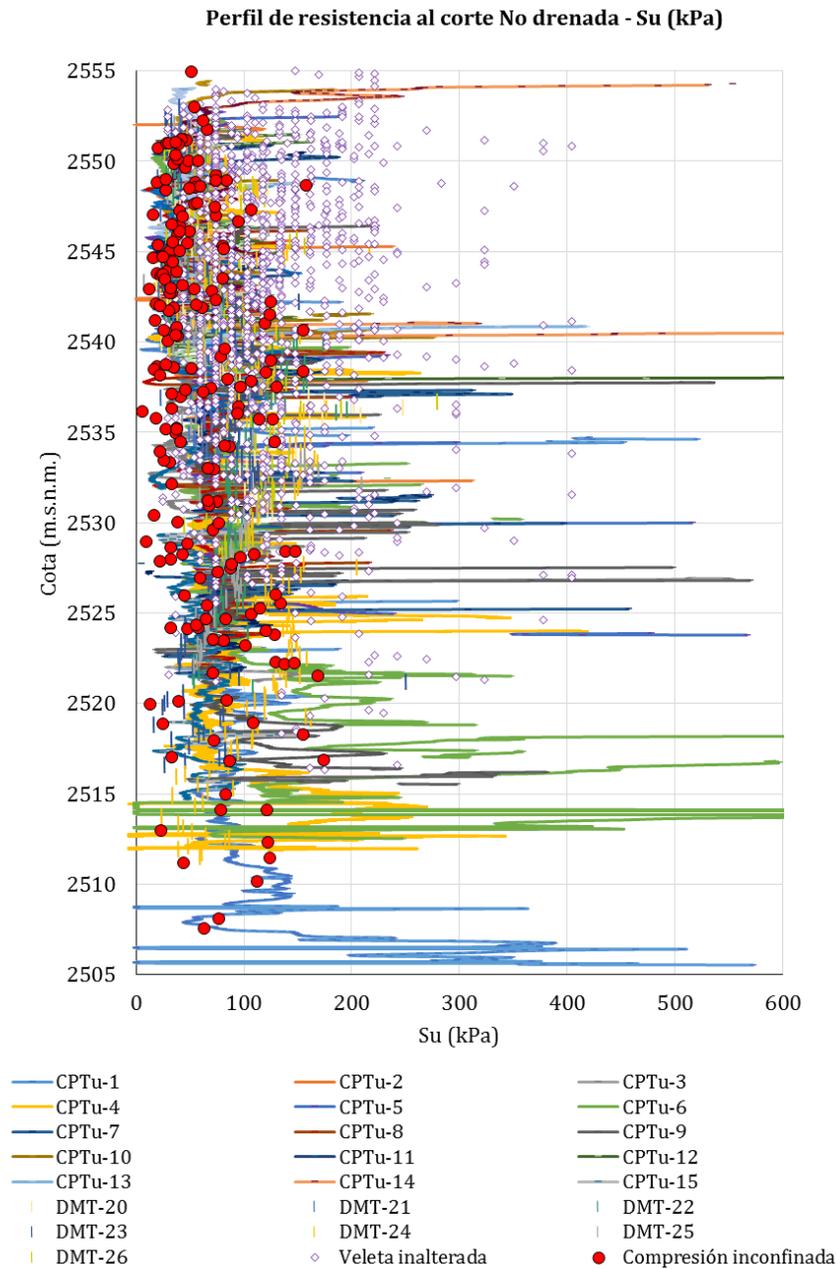
5.1.5 Resistencia al corte no drenada

En la Figura 5-6 se presenta la variación en profundidad de la resistencia al corte no drenada obtenida de los ensayos de compresión confinada y los ensayos de campo (veleta de campo, CPTu y DMT). En general se observa una tendencia entre los valores obtenidos mediante diferentes técnicas. El rango de valores en profundidad varía entre los 50 y 150 kPa. Sin embargo, en los ensayos CPTu se observan valores entre 300 y 500 kPa, valores presentados a diferentes profundidades, que se asocian con la presencia de lentes de arenas.

Se resalta que los valores de resistencia al corte no drenado de los ensayos CPTu los evaluó el Subcontratista empleando un factor de cono (Nkt) de 14. Este valor es un valor que se asume en los cálculos pero que debe

ajustarse de acuerdo con los resultados de laboratorio obtenidos. Ajustados los valores de resistencia al corte no drenada obtenidos en laboratorio se determinó que el N_{kt} es igual a 20. Es decir que los valores reportados en los informes por parte del subcontratista se deben multiplicarse por 0.7 ($=14/20$). Los valores presentados en la Figura 5-5 han sido ajustado como se mencionó anteriormente.

Figura 5-6 Variación en profundidad de la resistencia al corte no drenada



5.1.5.1 Determinación del factor de cono (NKT) promedio para los suelos finos de la PTAR Canoas.

La resistencia al corte no drenada (S_u) a partir de los ensayos in-situ de cono (CPTu) realizados se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{KT}}$$

Donde:

q_t : es la resistencia total del cono

σ_{v0} : es el esfuerzo vertical total de sobrecarga

N_{kt} : es el factor de cono

Típicamente NKT varía de 10 a 18 con un valor promedio de 14. NKT tiende a incrementarse con la plasticidad y disminuye con el incremento en la sensibilidad del suelo (Robertson & Cabal, 2014).

Si se dispone de experiencia previa en un depósito de suelo los valores de NKT se deben ajustar para reflejar esta experiencia. Por otra parte, en proyectos de moderado a alto riesgo, en donde se dispone de datos de ensayos de laboratorio de calidad, se deben desarrollar correlaciones específicas para el factor de cono NKT (Robertson & Cabal, 2014).

Para la estimación de la resistencia al corte no drenada (S_u) con base en las mediciones del ensayo de cono inicialmente se empleó el valor por defecto (default) del factor de cono (NKT) dado por el programa de computador CPeT-IT v.1.7.6.42 (GeoLogismiki, 2014) el cual es igual a 14.

Una vez se contó con los resultados de los ensayos de laboratorio de compresión inconfiada se revaluó la magnitud del factor de cono NKT. Como ejemplo, se muestra en la Figura 2 y la Figura 3 la estimación de la resistencia no drenada del CPTu-03 con base en valores de NKT igual a 14 y 20 respectivamente.

En la Figura 5-7 y la Figura 5-8 se indican las tendencias de límite inferior (lower bound, LB), mejor estimado (best estimate, BE) y límite superior (upper bound, UB).

Es evidente que el factor NKT de 14 no simula los valores medidos de compresión inconfiada y que con un valor de cono NKT igual a 20 se logra una mejor correlación entre los resultados de los ensayos de cono y compresión inconfiada.

Figura 5-7 Resistencia la corte no drenada del ensayo CPTU-03 para NKT = 14.

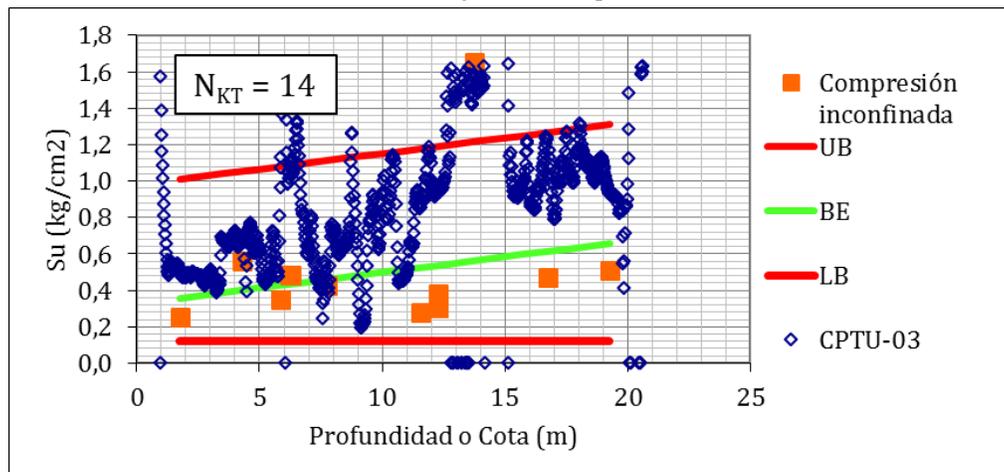
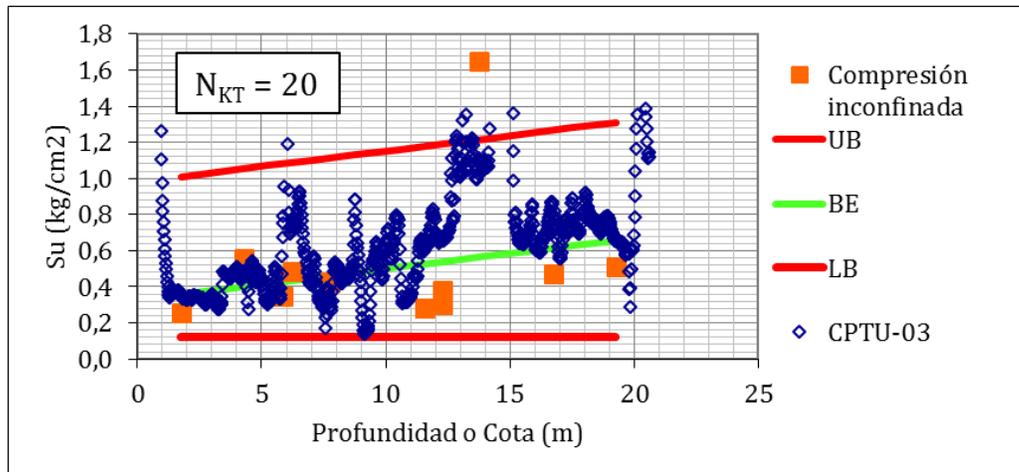


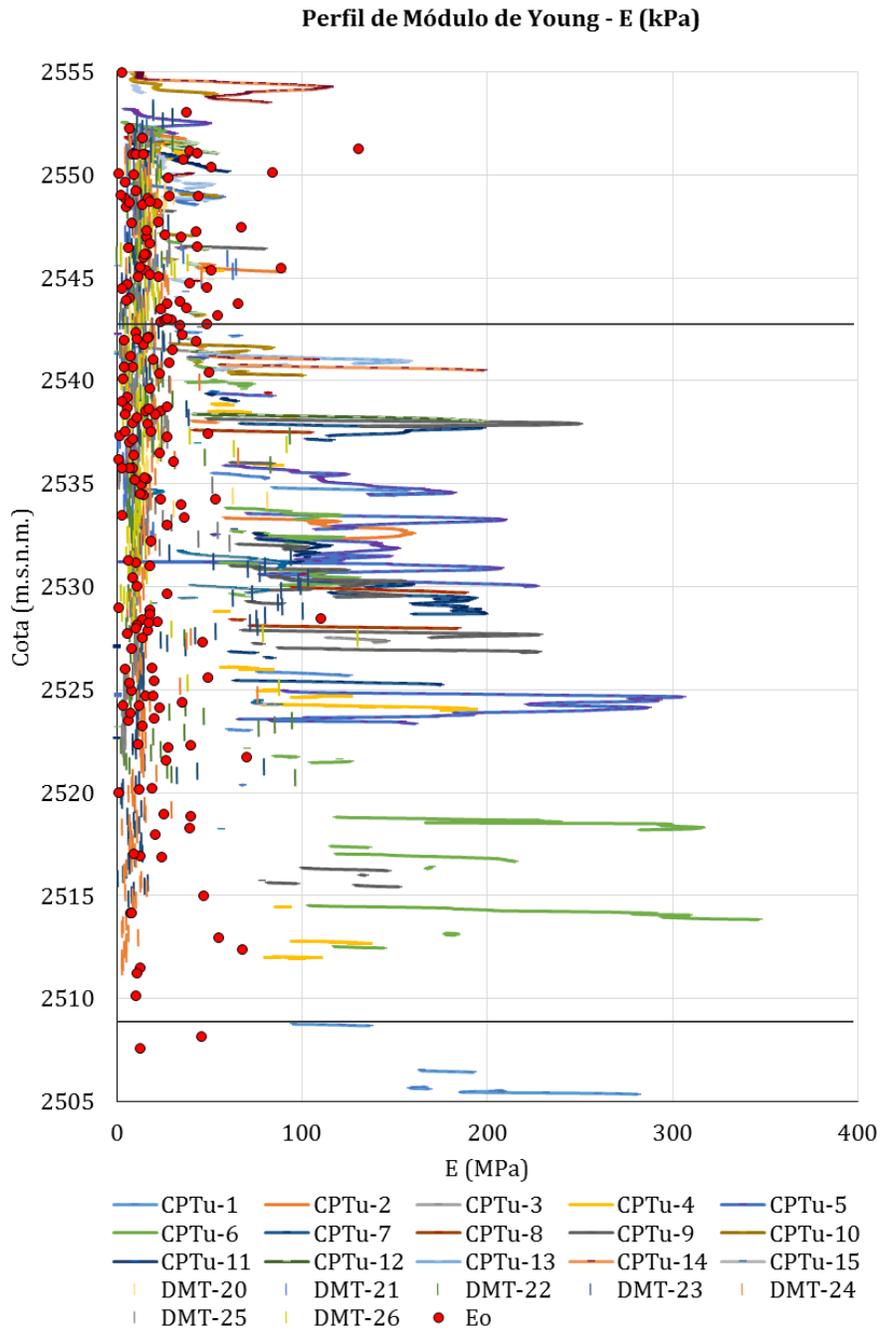
Figura 5-8 . Resistencia la corte no drenada del ensayo CPTU-03 para $N_{KT} = 20$.



5.1.6 Módulo de elasticidad

En la Figura 5-9 se presenta la variación del módulo de elasticidad en profundidad. Se observa que existe una tendencia entre los valores obtenidos en ensayos de laboratorio y los obtenidos en campo. En el perfil se observa que el módulo de elasticidad varía entre 6 y 200 MPa. También se observa que existen unos incrementos de los módulos a diferentes profundidades entre las cota 2543 y 2505, con valores entre 50 hasta 250 MPa. Valores asociados con materiales de mayor resistencia que podrían ser paleosuelos o lentes de arena.

Figura 5-9 Variación en profundidad del módulo de elasticidad.

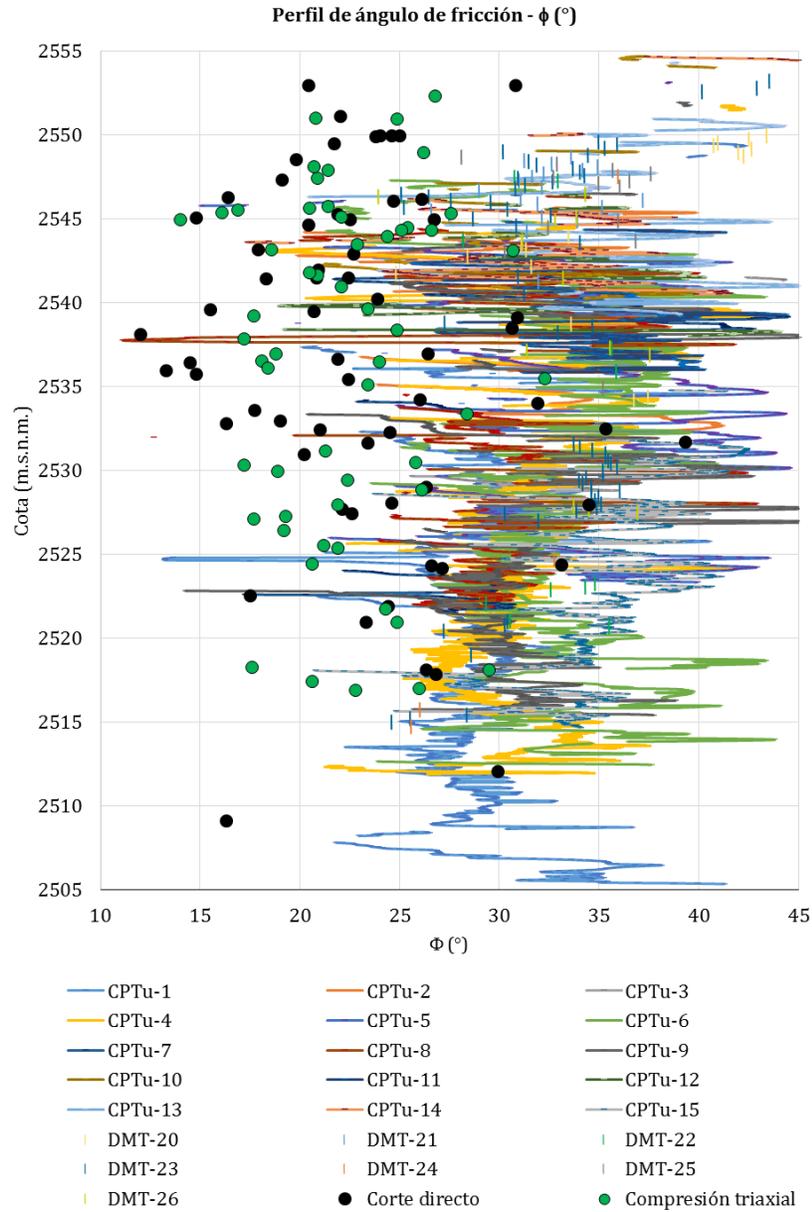


5.1.7 Ángulo de fricción efectiva

En la Figura 5-10 se presenta la variación del ángulo de fricción efectivo en profundidad. Se observa que en el grupo de valores obtenidos en laboratorio existe una tendencia pero que a la vez los datos presentan dispersión, los valores varían entre 15° y 35°. Caso similar ocurre con los valores de ángulos de fricción

obtenidos mediante ensayos de campo CPTu y DMT, pero con valores que varían entre 20° y 40°. En ambos casos se evidencia un rango de variación de unos 20°.

Figura 5-10 Variación en profundidad del ángulo de fricción efectivo



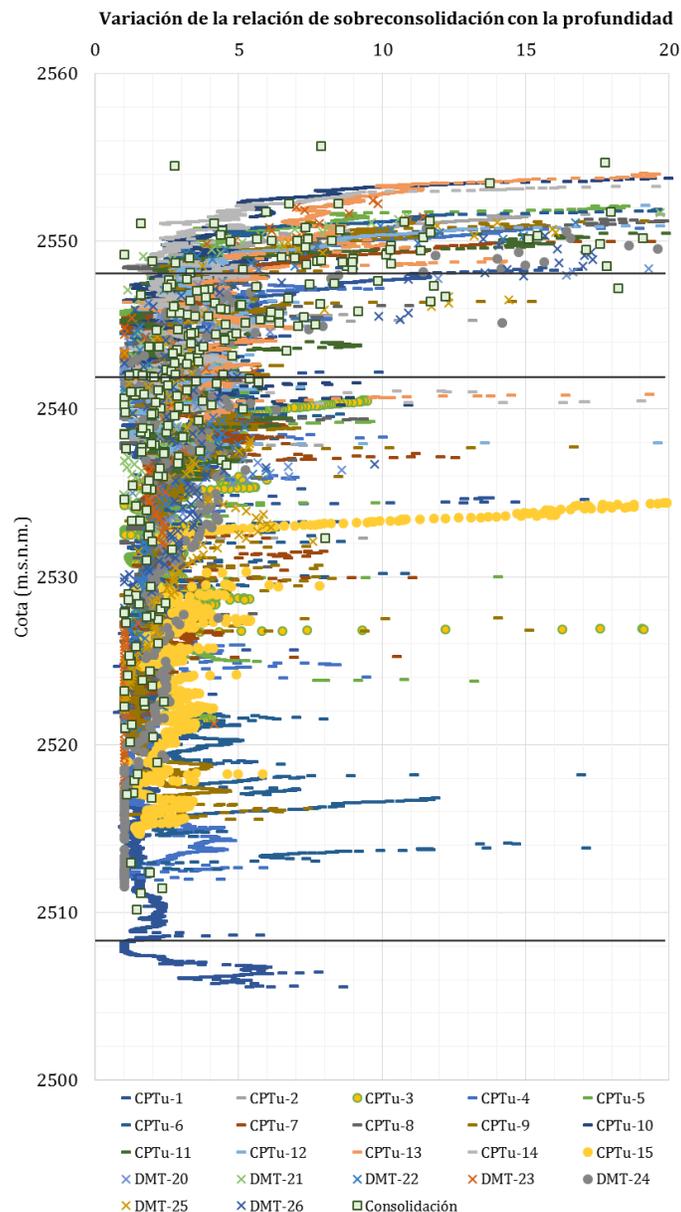
5.1.8 Relación de sobreconsolidación

En la Figura 5-11 se observan las relaciones de sobreconsolidación (RSC) obtenidas mediante ensayos de consolidación realizados en el laboratorio y las correlaciones empleadas en los ensayos CPT y DMT.

Se observa que entre la cota 2555 y la cota 2548 los materiales están sobreconsolidados, con RSC ENTRE 2 Y 20. Entre las cotas 2548 y la cota 2542 están ligeramente sobreconsolidados con RSC entre 2 y 5.

A partir de la cota 2542 hasta la cota 2508 la RSC tiende a disminuir con la profundidad a valores cercanos a 1, es decir a materiales normalmente consolidados. Es de resaltar que el depósito de suelos reposa sobre una roca meteorizada detectada entre las cotas 2505 y 2500.

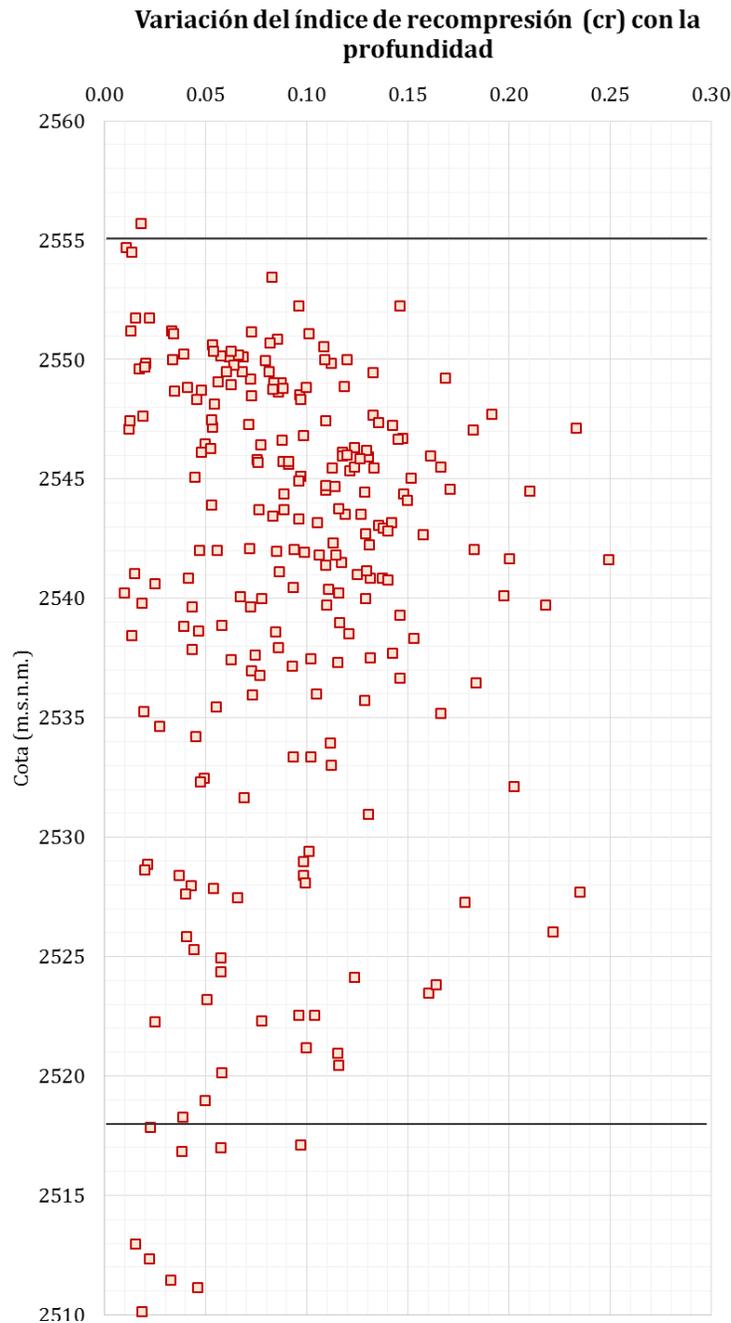
Figura 5-11 Variación de la relación de sobreconsolidación en profundidad



5.1.9 Índice de recompresión

En la Figura 5-12 se presenta la variación del índice de recompresión en profundidad, se observa que entre las cotas 2555 y la cota 2525 los valores del índice de recompresión varían desde 0.01 hasta 0,25. Mientras que de la cota 2525 a la cota 2518 varía entre 0,01 hasta 0,12 y entre las cotas 2518 y 2510 varía entre 0,01 y 0,05.

Figura 5-12 Variación del índice de recompresión en profundidad

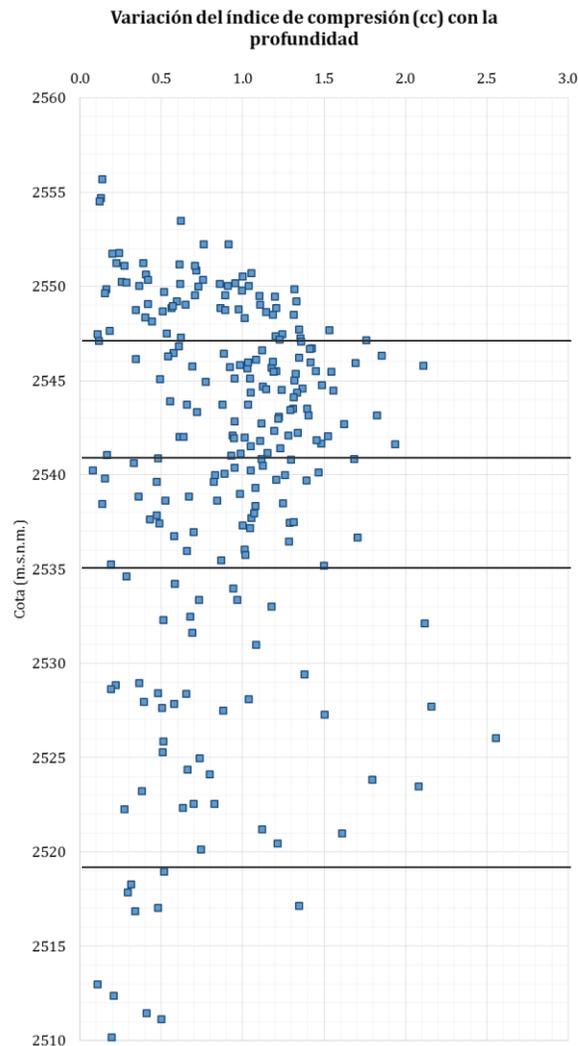


5.1.10 Índice de compresibilidad

En la Figura 5-13 se presenta la variación del índice de compresibilidad en profundidad. Desde la cota 2555 a la cota 2547 presenta valores entre 0,1 a 1,4, entre las cotas 2547 y 2542 varía entre 0,4 hasta 2,0, y vuelve a disminuir en las cotas 2542 a 2535 con valores entre 0,1 a 1,5.

Desde la cota 2535 a la 2518 se presenta una gran dispersión de los coeficientes de compresibilidad, esta dispersión se asocia a la presencia de materia orgánica y lentes de arena en las arcillas. Los valores en estas cotas varían entre 0,2 hasta 2,5. Por último entre las cotas 2518 y 2505 los coeficientes presentan valores entre 0,1 y 0,5.

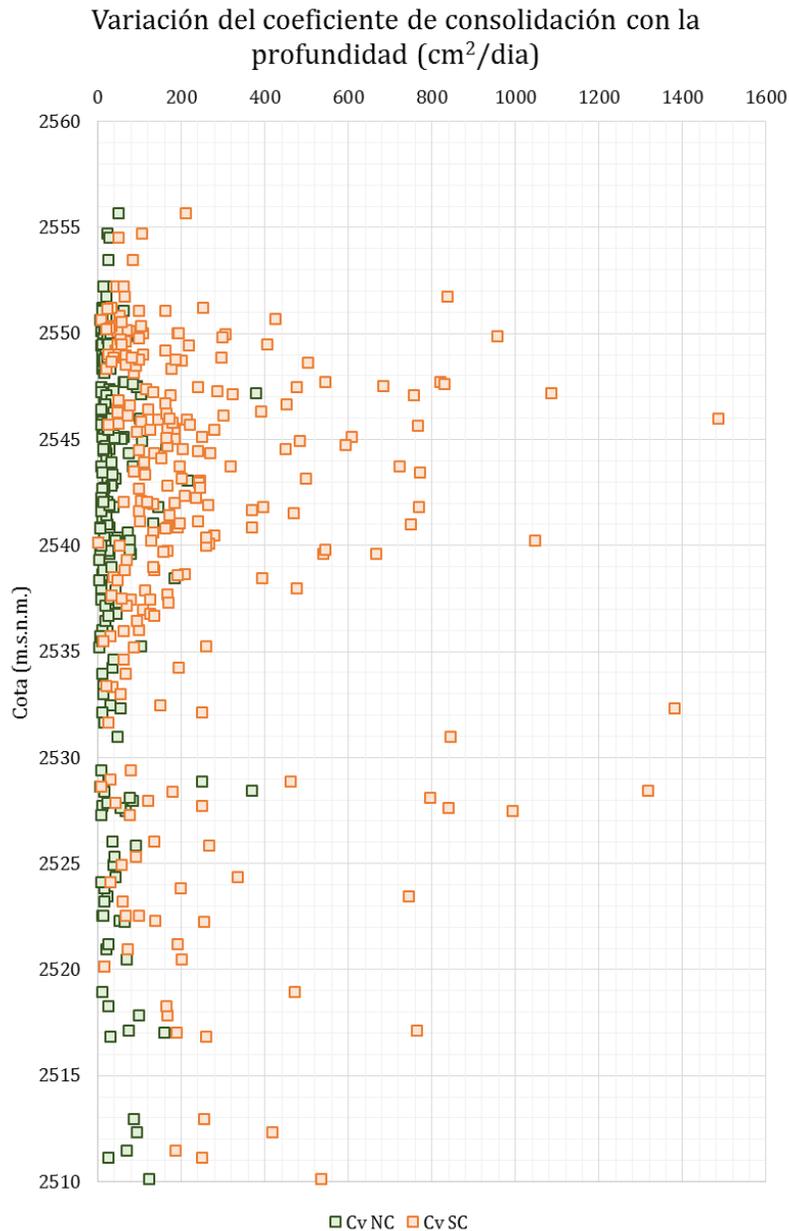
Figura 5-13 Variación del índice de compresibilidad en profundidad



5.1.11 Coeficiente de consolidación

En la Figura 5-14e presenta la variación del coeficiente de consolidación en profundidad, para las condiciones de esfuerzos: sobreconsolidado (Cv SC) y normalmente consolidado (Cv NC). En general se observa que el coeficiente de consolidación en condición sobreconsolidada es superior a la condición normalmente consolidada, la relación entre los dos (CvSC / CvNC) tiende a estar de 5 a 10 veces.

Figura 5-14 Variación de índice de consolidación en profundidad



5.2 Línea de refracción sísmica

Como complemento a la exploración geotécnica de la Fase I, se realizaron dos ensayos de dispersión de ondas superficiales y refracción sísmica. Mediante este ensayo se construyeron modelos con la variación de velocidad de onda de corte en profundidad. Además, se ejecutó una tomografía en una línea de 235 m localizada en la zona en la que se proyecta la estructura de descarga de la PTAR Canoas al río Bogotá.

De los análisis realizados se encontró que a partir de los 50 metros de profundidad, tanto en la refracción como en el análisis de dispersión de ondas superficiales, se presentan un cambio marcado de rigidez de los materiales. Este cambio sugiere la presencia de un material rocoso que de acuerdo con la exploración de campo ejecutada correspondería a la arcillolita verdosa muy meteorizada.

Los trabajos de campo y resultados de la línea de refracción sísmica fueron ejecutados por la empresa JEOPROBE, la cual es una firma de geotecnia especializada. El informe e interpretación de los trabajos se presentan en el Anexo 4 (Informe de actividades de campo y registros de ensayos de campo).

5.3 Ensayos de mineralogía

Como complemento de los ensayos de laboratorio de la determinación del porcentaje de expansión de los suelos explorados, se ejecutaron 5 ensayos de identificación de minerales mediante difracción con rayos X, en las muestras con mayor porcentaje de expansión. Los ensayos fueron ejecutados por el laboratorio GMAS + Consultores. Como resultados se obtuvo el porcentaje en peso de los siguientes minerales: Cuarzo, ilita, caolinita, montmorrillonita, siderita, cordierita, yeso y albita. Cabe mencionar que la cantidad de muestra requerida para el ensayo varía entre 4 y 10 gramos, cantidad poco representativa para un total de muestra recuperada ya fuese de tubo Shelby o del ensayo SPT.

Los resultados de los contenidos de minerales se presentan en Anexo 5 (Resultados de ensayos de laboratorio de propiedades índice, de resistencia y de compresibilidad).

Sección 6

Perfiles estratigráficos

Compilados todos los resultados de ensayos de laboratorio y campo e identificación de materiales, se procedió a la elaboración de los perfiles estratigráficos en la zona del proyecto Fase I. Dicha elaboración guiada por el especialista en geotecnia y desarrollada por los ingenieros de proyecto.

Para ello se emplearon perfiles del terreno en sentido Norte -Sur y Oriente - Occidente, luego se proyectaron los puntos de exploración más cercanos (distanciados hasta 50 m). Posteriormente se graficó en cada perfil y en cada perforación las propiedades índice, de resistencia y de compresibilidad (contenido de humedad natural, límites de Atterberg, contenido de materia orgánica, contenidos de finos, resistencia al corte no drenada, intercepto de cohesión, ángulo de fricción, relación de sobreconsolidación, etc) y su variación en profundidad. Por último se definieron los espesores de materiales que tienen descripciones y propiedades similares.

La Figura 6-1 y la Figura 6-2 presentan la localización en planta de los 12 perfiles definidos y el perfil estratigráfico N°3. En el Anexo 8 se presentan los planos de localización de perfiles estratigráficos y detalle de los trece perfiles definidos.

Figura 6-1 Localización en planta de perfiles estratigráficos

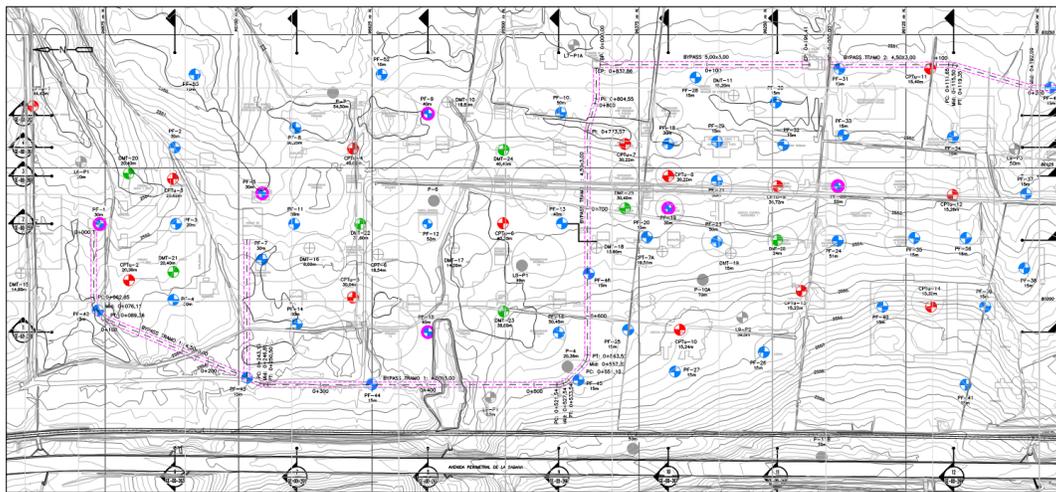
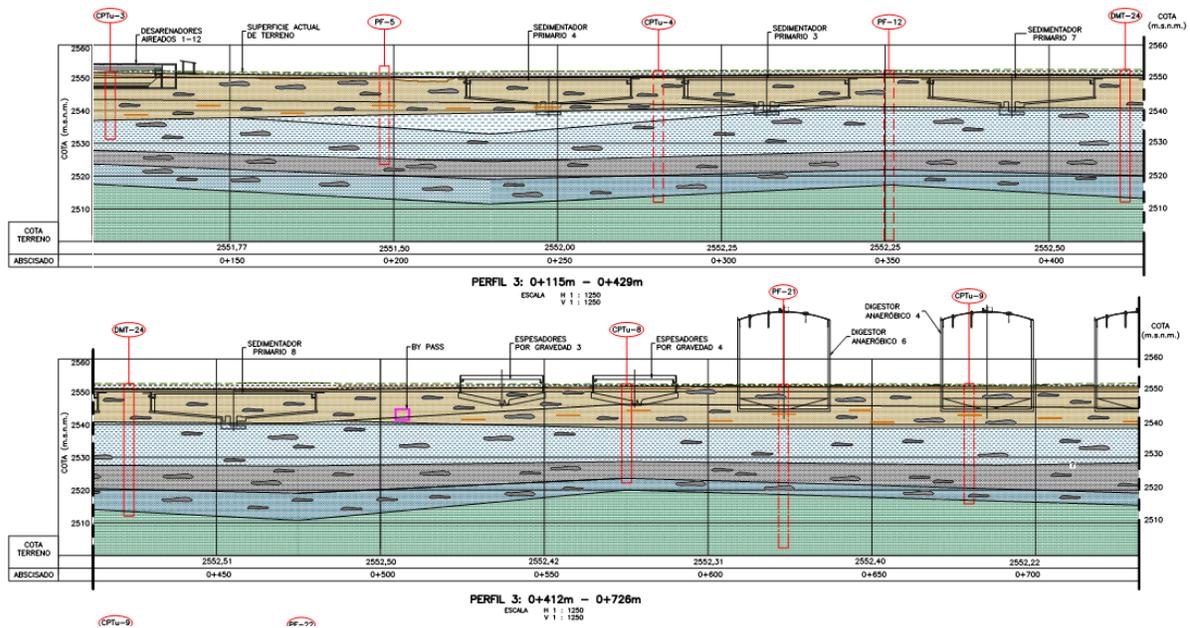


Figura 6-2 Perfiles estratigráficos



En general se definieron nueve capas de materiales, siendo la capa 1 la más superficial y la capa 9 la más profunda. Estas capas se describen como:

- Capa 1: Limo arcilloso con presencia de raíces y oxidaciones y fuertemente consolidada. Este material se encuentra entre los 0,5 m y 4,0 m de profundidad en el área general de la PTAR.
- Capa 2: Arcilla limosa, gris habana de alta plasticidad, sobreconsolidada, con presencia de planos de oxidados y lentes areno limosos. Esta capa tiene un espesor que varía entre 4 y 12 m.
- Capa 3: Arcilla limosa habana de alta plasticidad, ligeramente sobreconsolidada, con lentes de arena limosa y concreciones de óxido de hierro. Tiene un espesor entre 2 y 7m.
- Capa 4: Arcilla limosa, gris clara con presencia de fisuras. Esta capa está ligeramente sobreconsolidada. Presenta un espesor variable entre 1 y 9 m. Esta capa se localiza particularmente en la zona norte de los 16 tanques sedimentadores.
- Capa 5: Arcilla limosa gris oscura con lentes de arena. Tiene un espesor entre 7 y 14 m.
- Capa 6: Arena fina limosa gris con lentes de materia orgánica. Presenta un espesor promedio de 1 y 2 m. Esta capa de arena se detectó particularmente en la zona de los sedimentadores 1 y 4.
- Capa 7: Limo orgánico y arcillas limosas de color gris oscuro, con lentes de arena. Estos materiales se encuentran interdigitados y esta disposición se asocia con los procesos de divagación, inundación y acumulación del río Bogotá. Esta capa tiene un espesor entre 4 y 11 m en toda el área de la PTAR Canoas – Fase I.
- Capa 8: Arcilla limosa gris clara, con presencia de lentes de arena, con espesor entre 2 y 12 m. Su espesor es menor en la cercanía a la Formación Arenisca Labor y Tierna.

- Capa 9: Arcillolita meteorizada de color verde. Este material se detectó a profundidades variables entre los 45 y 55 metros de profundidad. La arcillolita buza en sentido occidente – oriente. Sin embargo, no se detectó en todas las perforaciones profundas.

Sección 7

Análisis estadístico de la variación de las propiedades del subsuelo en profundidad

En general todas las propiedades del suelo presentan una relación lineal en profundidad (x) aunque con una dispersión apreciable. Para el proyecto de la PTAR Canoas se realizó un análisis estadístico simple con el fin de poder estimar propiedades de los diferentes tipos de suelo para diseño. Este análisis se efectuó de la siguiente manera para todas las propiedades determinadas en el campo y laboratorio.

- Se agruparon los valores de cada una de las propiedades en los siguientes grupos de estructuras Fase I de la PTAR Canoas.
 - Tratamiento preliminar
 - Tanques sedimentadores
 - Tanques digestores
 - Edificios de operaciones
 - By Pass y efluente final
- Se determinó el número de datos (n).
- Se determinó por regresión lineal la tendencia para el mejor estimado (BE, best estimate) de la propiedad analizada en función de la profundidad o la cota (x), calculando la pendiente (m) y el intercepto (b).

$$BE = mx + b$$

- Se calculó la desviación estándar en la estimación de la propiedad analizada (SYX). Esta es básicamente la desviación estándar de las diferencias con respecto a la línea de regresión. Se debe recordar que una desviación estándar incluye cerca del 68% de los datos, mientras que 1.96 desviaciones estándar contiene el 95% de los datos.
- Se calculó el número de desviaciones estándar (t) que contiene cierto porcentaje dado de los datos (1- α), por ejemplo para el 90% de los datos se obtiene 1.65 desviaciones estándar.
- Se calcula el incremento o decremento (CI) en el valor medio de la propiedad para tener el porcentaje dados de la propiedad. Esto se calcula como el producto de la desviación estándar de la propiedad analizada y el número de desviaciones estándar calculadas en el paso anterior (e). Es decir, $CI = t * SYX$.
- Con base en la regresión lineal calculada se estiman los valores de límite inferior (LB) o límite superior (UB) en profundidad o cota (x) con las siguientes formulas:

$$LB = mx + b - CI \geq \text{valor mínimo}$$

$$UB=mx+b+CI \leq \text{valor máximo}$$

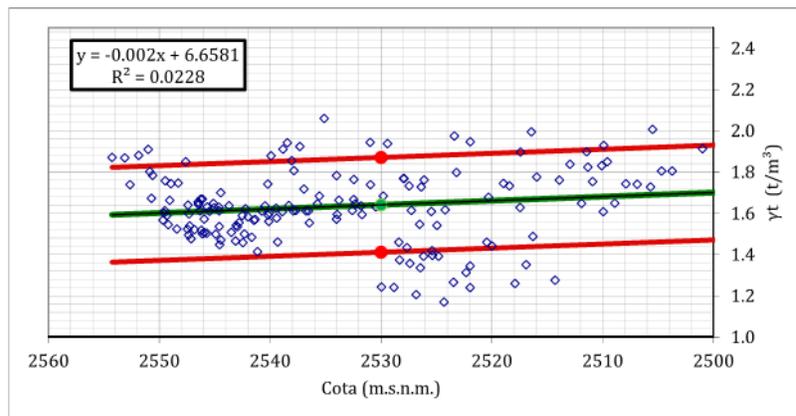
Se debe tener en cuenta que la magnitud de las propiedades estimadas estén dentro de los límites mínimos y máximos medidos y/o posibles de la propiedad analizada.

En la Figura 1 se ilustra un ejemplo del cálculo para la resistencia al corte no drenada (S_u) teniendo en cuenta todos los datos determinados para el lote de la PTAR Canoas. En el ejemplo se determinaron las líneas de tendencia del límite inferior y superior que contienen el 90% de los datos. Es importante notar que una vez se tienen las ecuaciones de las líneas de tendencia se pueden calcular las magnitudes del límite inferior (BE), mejor estimado (BE) y límite superior (UB) a una cota o profundidad determinada. En el ejemplo de la Figura 7-1 se calcularon para una cota de 2530 el valor del peso unitario.

Figura 7-1 Estimación de peso unitario total (γ_t) en profundidad para la zona de tratamiento preliminar de la PTAR Canoas.



ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PARA LA INGENIERÍA DE DETALLE DE LA PTAR CANOAS
ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES EN PROFUNDIDAD
ZONA DE TRATAMIENTO PRELIMINAR



Percentiles			x =	2530
LB	P10.0	yLB = -0.002 x + 1.482	LB	1.412
BE	P50.0	yBE = -0.002 x + 6.658	BE	1.641
UB	P90.0	yUB = -0.002 x + 1.941	UB	1.871

Para determinar las propiedades geotécnicas promedio de cada una de las capas de suelo en el área de la Fase I de la PTAR, se llevó a cabo el análisis estadístico por percentiles y se asignaron los valores, mejores estimados, límite inferior y límite superior a cada propiedad. El resumen gráfico de estos valores generalizados en el área de la Fase I se presenta en el Anexo 7 (Análisis de resultados de laboratorio). El análisis por percentiles de las diferentes propiedades del suelo para el Producto 7 se realizó empleando un intervalo, este análisis se detallará empleando para evaluar las diferentes propiedades en la ingeniería de detalle 1, 3,5 y hasta 10 intervalos.

Sección 8

Posición de nivel de agua subterránea

En la presente sección se muestra el análisis de los niveles freáticos registrados en las lecturas que se han efectuado hasta la fecha de edición del presente Informe, de cada uno de los piezómetros instalados en la zona de estudio.

Se define como nivel freático al lugar geométrico de puntos del suelo en los que la presión de agua es igual a la atmosférica. Por debajo del nivel freático las presiones son positivas. Para condiciones estáticas del agua, en un cierto suelo, el nivel freático sería una superficie horizontal; sin embargo, si existe la posibilidad de que el agua fluya dentro del suelo, no hay razón para que el nivel freático siga siendo horizontal: en este caso, el nivel freático en un punto varía con respecto a las variaciones de precipitación, topografía y presión atmosférica. Se define como nivel piezométrico la altura que alcanza el agua en un tubo vertical o piezómetro en un punto determinado.

Es importante notar, que el nivel piezométrico de un punto dentro de un perfil de suelo puede ser diferente al nivel freático medido en el mismo perfil.

Para el diseño de la Fase I se instalaron 14 piezómetros distribuidos de manera que las lecturas registradas puedan brindar una idea del comportamiento del agua subterránea para los diferentes grupos de estructuras que componen la PTAR (ver plano de Anexo 9). De estos 14 piezómetros, 10 corresponden a piezómetros abiertos con tubería ranurada y los restantes son piezómetros con celda tipo Casagrande.

8.1 Lectura inicial

Previo al inicio de cada perforación se solicitó al operador de la máquina avanzar en seco hasta encontrar agua y tomar la lectura del nivel inicial; a partir de ese punto ya se pudo avanzar con lavado. Esta instrucción se siguió en la mayoría de las perforaciones ejecutadas.

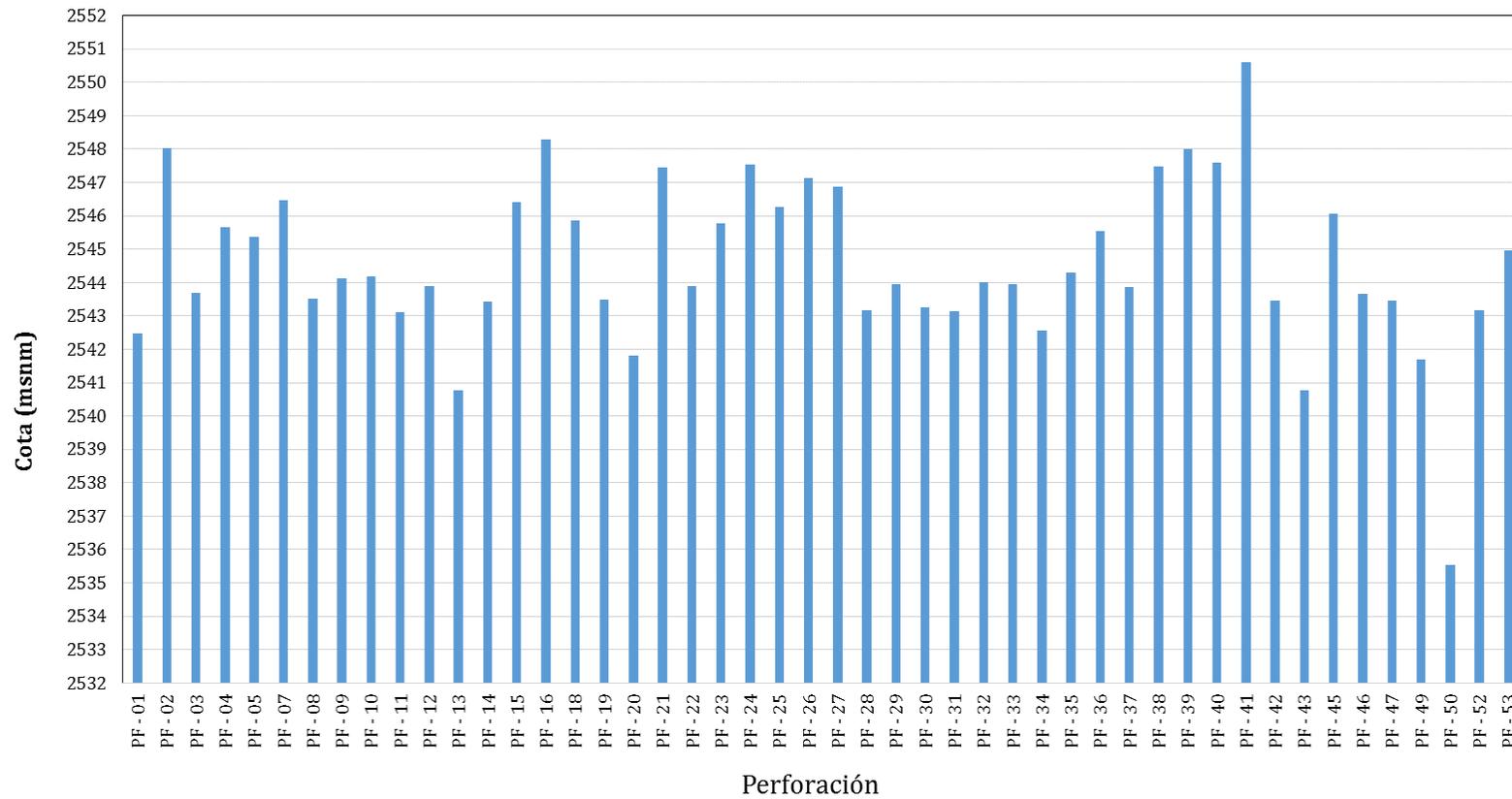
En la Figura 8-1 se representan las lecturas de nivel freático inicial de cada perforación. En la gráfica se muestran las elevaciones del nivel freático con referencia a la cota de cada perforación. De la Figura 8-1 se puede establecer que la profundidad promedio registrada fue de 9,0 m. Adicionalmente, se resalta el hecho de que los registros de nivel freático ubican la lámina de agua fluctuando entre las Capas 2 a 4 definidas en los perfiles estratigráficos, es decir, entre la arcilla limosa gris con oxidaciones, la arcilla limosa habana con lentes de arena, arcilla limosa gris clara y arcilla limosa gris oscura con lentes de arena, respectivamente.

El nivel aparentemente bajo del PF-50 se debe a que esta perforación se localiza sobre la margen izquierda del río, donde la cota del terreno es marcadamente inferior a la de la zona de emplazamiento de las estructuras de la PTAR Canoas.

Durante las primeras lecturas se evidenciaron trazas de arcilla en la sonda en algunos piezómetros, situación que conllevó a adoptar un programa de seguimiento. Luego de varias lecturas se concluyó que

pese a la situación descrita, las lecturas tomadas registraron un comportamiento regular con tendencia a estabilizarse en valores determinados.

Figura 8-1 Lecturas de nivel freático detectado a inicio de las perforaciones



8.2 Piezómetro abierto

Los piezómetros abiertos con tubería ranurada se instalaron a 20 m de profundidad, a excepción del PF-26 y el PF-31 que se instalaron a 15 m; la profundidad de los piezómetros coincide con la profundidad de la perforación correspondiente. Estos 10 piezómetros se instalaron en la periferia de la zona destinada a la construcción de las estructuras principales de la PTAR, que incluyen Cribado, Sedimentadores, Espesadores y Edificios de Control.

Los piezómetros de tubo abierto miden la presión máxima del agua en toda su profundidad. En la Figura 8-2 se muestra la adecuación e instalación de un piezómetro abierto o tubería perforada recubierta con geotextil.

Figura 8-2 Tubo perforado recubierto por geotextil

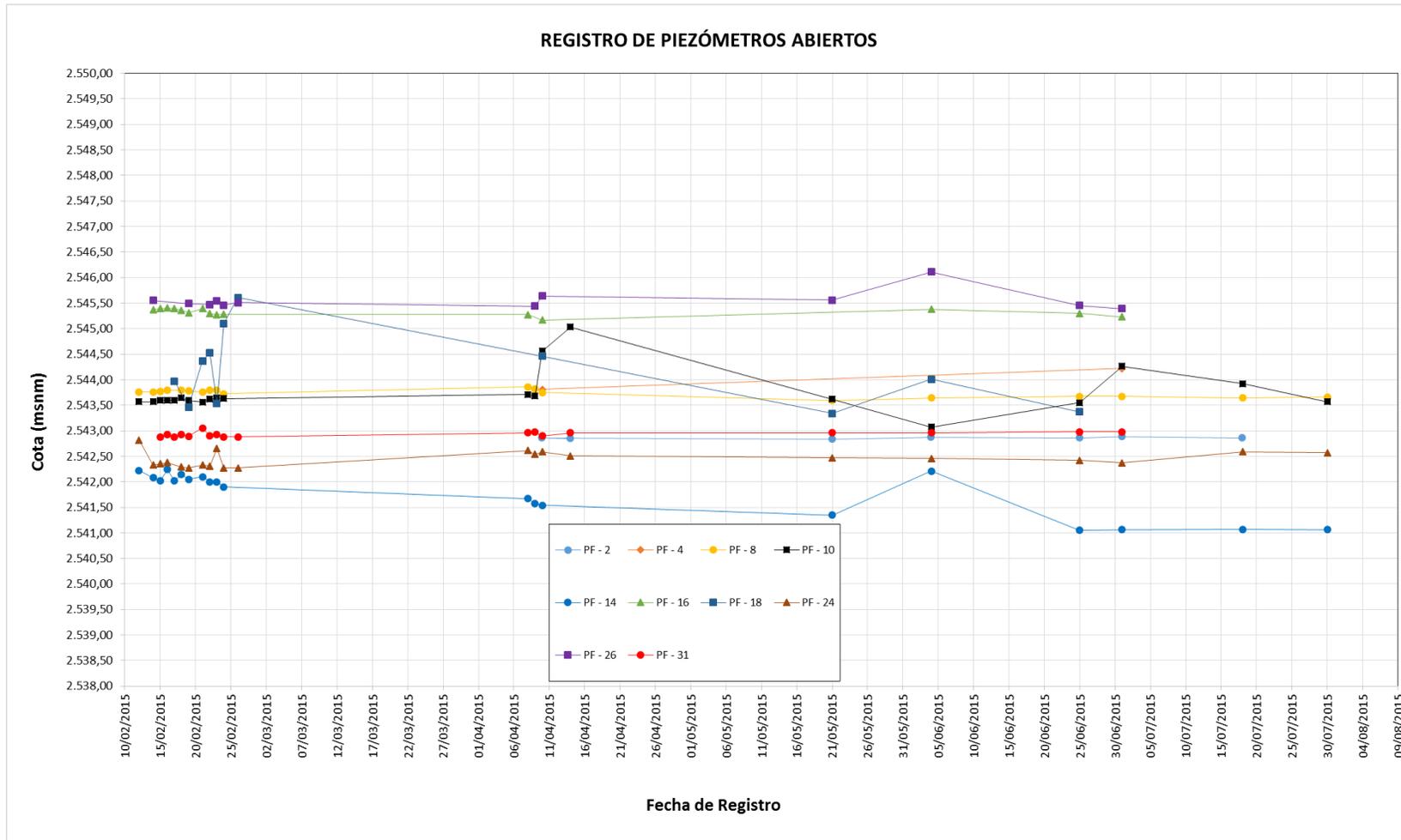


El comportamiento del nivel freático, de acuerdo con la Figura 8-3, se ha mantenido casi constante para la totalidad de los piezómetros a lo largo del tiempo en el que se han registrado lecturas (febrero a agosto de 2015).

Las pequeñas fluctuaciones en los niveles podrían asociarse al incremento en el régimen de lluvias según la temporada y, en algunos casos, a posibles errores de lectura atribuibles a la dificultad de tomarlas bajo condiciones del terreno difíciles, como potreros anegados para el riego de pastos.

Como se aprecia en la Figura 8-3 los piezómetros PF-10 y PF-18 son los que presentan un comportamiento menos uniforme en las lecturas respecto de los demás, aunque se evidencia que tienden a estabilizarse según los últimos registros. Se aclara sin embargo que se descartaron algunas mediciones en estas dos perforaciones por considerarse erráticas ya que no permitían distinguir la tendencia en la fluctuación del nivel.

Figura 8-3 Lecturas de piezómetros abiertos



Los datos utilizados para obtener dicha tendencia, se muestran en la ordenada de la Figura 8-3 corresponden a las lecturas realizadas desde la fecha de instalación hasta la fecha de edición del presente informe.

Tabla 8-1 Registros de lectura piezómetros abiertos

PIEZÓMETRO ABIERTO						
PIEZÓMETRO PF.	No. REGISTRO	FECHA	HORA	COTA SUPERFICIE DEL TERRENO (msnm)	LECTURA (m)	NIVEL (msnm)
2	1	4/14/2015	11:35:00 AM	2551,03	8,19	2.542,84
	2	4/10/2015	2:20:00 PM		8,17	2.542,86
	3	5/21/2015	11:40:00 AM		8,20	2.542,83
	4	6/4/2015	12:30:00 PM		8,16	2.542,87
	5	6/25/2015	10:00:00 AM		8,17	2.542,86
	6	7/1/2015	1:00:00 PM		8,15	2.542,88
	7	7/18/2015	10:00:00 PM		8,17	2.542,86
4	2	4/6/2015	10:15:00 AM	2552,95	9,34	2.543,61
	1	4/10/2015	2:20:00 PM		9,14	2.543,81
	3	7/1/2015	1:15:00 PM		8,73	2.544,22
8	1	2/12/2015	10:15:00 AM	2551,6	7,84	2543,76
	2	2/14/2015	10:15:00 AM		7,84	2543,76
	3	2/15/2015	10:15:00 AM		7,83	2543,77
	4	2/16/2015	10:40:00 AM		7,81	2543,79
	5	2/18/2015	10:40:00 AM		7,81	2543,79
	6	2/19/2015	9:30:00 AM		7,82	2543,78
	7	2/21/2015	10:00:00 AM		7,84	2543,76
	8	2/22/2015	10:00:00 AM		7,81	2543,79
	9	2/23/2015	10:00:00 AM		7,81	2543,79
	10	2/24/2015	10:00:00 AM		7,88	2543,72
	11	4/8/2015	11:10:00 AM		7,74	2543,86
	12	4/9/2015	11:55:00 AM		7,78	2543,82
	13	4/10/2015	2:20:00 PM		7,85	2543,75
	14	5/21/2015	11:25:00 AM		8,01	2543,59
	15	6/4/2015	12:17:00 PM		7,96	2543,64
	16	6/25/2015	12:14:00 PM		7,93	2543,67
	17	7/1/2015	12:10:00 PM		7,93	2543,67
	18	7/18/2015	10:00:00 AM		7,96	2543,64
	19	7/30/2015	10:30:00 AM		7,94	2543,66
10	1	2/12/2015	10:15:00 AM	2551,6	8,03	2543,57
	2	2/14/2015	10:15:00 AM		8,03	2543,57
	3	2/15/2015	10:15:00 AM		8	2543,6
	4	2/16/2015	10:40:00 AM		8,01	2543,59
	5	2/17/2015	10:40:00 AM		8	2543,6
	6	2/18/2015	10:40:00 AM		7,95	2543,65
	7	2/19/2015	9:30:00 AM		8,01	2543,59
	8	2/21/2015	10:00:00 AM		8,04	2543,56
	9	2/22/2015	10:00:00 AM		7,98	2543,62
	10	2/23/2015	10:00:00 AM		7,96	2543,64
	11	2/24/2015	10:00:00 AM		7,97	2543,63
	12	4/8/2015	10:15:00 AM		7,89	2543,71
	13	4/9/2015	11:15:00 AM		7,92	2543,68
	14	4/10/2015	2:20:00 PM		7,04	2544,56

PIEZÓMETRO ABIERTO						
PIEZÓMETRO PF.	No. REGISTRO	FECHA	HORA	COTA SUPERFICIE DEL TERRENO (msnm)	LECTURA (m)	NIVEL (msnm)
	15	4/14/2015	11:00:00 AM		6,57	2545,03
	16	5/21/2015	10:58:00 AM		7,98	2543,62
	17	6/4/2015	12:34:00 PM		8,53	2543,07
	18	6/25/2015	11:45:00 AM		8,05	2543,55
	19	7/1/2015	11:50:00 AM		7,34	2544,26
	20	7/18/2015	10:00:00 AM		7,68	2543,92
	21	7/30/2015	10:30:00 AM		8,03	2543,57
14	1	2/12/2015	10:15:00 AM	2553,6	11,38	2542,22
	2	2/14/2015	10:25:00 AM		11,52	2542,08
	3	2/15/2015	10:25:00 AM		11,58	2542,02
	4	2/16/2015	10:40:00 AM		11,36	2542,24
	5	2/17/2015	10:40:00 AM		11,58	2542,02
	6	2/18/2015	10:40:00 AM		11,45	2542,15
	7	2/19/2015	9:30:00 AM		11,55	2542,05
	8	2/21/2015	10:00:00 AM		11,5	2542,1
	9	2/22/2015	10:00:00 AM		11,6	2542
	10	2/23/2015	10:00:00 AM		11,6	2542
	11	2/24/2015	10:00:00 AM		11,7	2541,9
	12	4/8/2015	11:20:00 AM		11,93	2541,67
	13	4/9/2015	12:20:00 PM		12,02	2541,58
	14	4/10/2015	2:20:00 PM		12,06	2541,54
	15	5/21/2015	11:58:00 AM		12,25	2541,35
	16	6/4/2015	12:42:00 PM		11,39	2542,21
	17	6/25/2015	12:16:00 PM		12,55	2541,05
	18	7/1/2015	11:45:00 AM		12,54	2541,06
	19	7/18/2015	10:00:00 AM		12,53	2541,07
	20	7/30/2015	10:30:00 AM		12,54	2541,06
16	1	2/14/2015	9:45:00 AM	2554	8,63	2545,37
	2	2/15/2015	10:00:00 AM		8,61	2545,39
	3	2/16/2015	10:40:00 AM		8,6	2545,4
	4	2/17/2015	10:40:00 AM		8,61	2545,39
	5	2/18/2015	10:40:00 AM		8,64	2545,36
	6	2/19/2015	9:30:00 AM		8,69	2545,31
	7	2/21/2015	10:00:00 AM		8,61	2545,39
	8	2/22/2015	10:00:00 AM		8,71	2545,29
	9	2/23/2015	10:00:00 AM		8,73	2545,27
	10	2/24/2015	10:00:00 AM		8,72	2545,28
	11	4/8/2015	10:45:00 AM		8,73	2545,27
	12	4/10/2015	2:20:00 PM		8,83	2545,17
	13	6/4/2015	11:52:00 AM		8,62	2545,38
	14	6/25/2015	12:00:00 PM		8,7	2545,3
	15	7/1/2015	12:00:00 PM		8,77	2545,23
18	1	2/17/2015	9:30:00 AM	2551,99	8,02	2543,97
	2	2/19/2015	9:30:00 AM		8,53	2543,46
	3	2/21/2015	10:00:00 AM		7,62	2544,37
	4	2/22/2015	10:00:00 AM		7,47	2544,52
	5	2/23/2015	10:00:00 AM		8,46	2543,53
	6	2/24/2015	10:00:00 AM		6,89	2545,1
	7	2/26/2015	10:00:00 AM		6,38	2545,61

PIEZÓMETRO ABIERTO						
PIEZÓMETRO PF.	No. REGISTRO	FECHA	HORA	COTA SUPERFICIE DEL TERRENO (msnm)	LECTURA (m)	NIVEL (msnm)
	9	4/10/2015	2:20:00 PM		7,53	2544,46
	10	5/21/2015	10:35:00 AM		8,65	2543,34
	11	6/4/2015	11:38:00 AM		7,98	2544,01
	12	6/25/2015	11:50:00 AM		8,62	2543,37
24	1	2/12/2015	10:15:00 AM	2553,54	10,72	2542,82
	2	2/14/2015	10:40:00 AM		11,21	2542,33
	3	2/15/2015	11:00:00 AM		11,19	2542,35
	4	2/16/2015	10:40:00 AM		11,16	2542,38
	5	2/18/2015	10:40:00 AM		11,25	2542,29
	6	2/19/2015	9:30:00 AM		11,27	2542,27
	7	2/21/2015	10:00:00 AM		11,21	2542,33
	8	2/22/2015	10:00:00 AM		11,23	2542,31
	9	2/23/2015	10:00:00 AM		10,89	2542,65
	10	2/24/2015	10:00:00 AM		11,27	2542,27
	11	2/26/2015	10:00:00 AM		11,27	2542,27
	12	4/8/2015	9:40:00 AM		10,93	2542,61
	13	4/9/2015	9:27:00 AM		11	2542,54
	14	4/10/2015	2:20:00 PM		10,95	2542,59
	15	4/14/2015	10:30:00 AM		11,03	2542,51
	16	5/21/2015	10:10:00 AM		11,07	2542,47
	17	6/4/2015	11:58:00 AM		11,08	2542,46
	18	6/25/2015	11:12:00 AM		11,12	2542,42
	19	7/1/2015	10:50:00 AM		11,17	2542,37
	20	7/18/2015	10:00:00 AM		10,95	2542,59
	21	7/30/2015	10:30:00 AM		10,97	2542,57
26	1	2/14/2015	9:40:00 AM	2555,73	10,18	2545,55
	2	2/19/2015	9:30:00 AM		10,24	2545,49
	3	2/22/2015	10:00:00 AM		10,26	2545,47
	4	2/23/2015	10:00:00 AM		10,19	2545,54
	5	2/24/2015	10:00:00 AM		10,27	2545,46
	6	2/26/2015	10:00:00 AM		10,22	2545,51
	7	4/9/2015	10:10:00 AM		10,29	2545,44
	8	4/10/2015	2:20:00 PM		10,09	2545,64
	9	5/21/2015	10:25:00 AM		10,17	2545,56
	10	6/4/2015	11:21:00 AM		9,62	2546,11
	11	6/25/2015	11:34:00 AM		10,28	2545,45
	12	7/1/2015	11:02:00 AM		10,34	2545,39
31	1	2/15/2015	10:40:00 AM	2551,07	8,19	2542,88
	2	2/16/2015	10:40:00 AM		8,15	2542,92
	3	2/17/2015	10:40:00 AM		8,19	2542,88
	4	2/18/2015	10:40:00 AM		8,15	2542,92
	5	2/19/2015	9:30:00 AM		8,18	2542,89
	6	2/21/2015	10:00:00 AM		8,02	2543,05
	7	2/22/2015	10:00:00 AM		8,17	2542,9
	8	2/23/2015	10:00:00 AM		8,14	2542,93
	9	2/24/2015	10:00:00 AM		8,19	2542,88
	10	2/26/2015	10:00:00 AM		8,19	2542,88
	11	4/8/2015	9:55:00 AM		8,11	2542,96
	12	4/9/2015	9:42:00 AM		8,1	2542,97

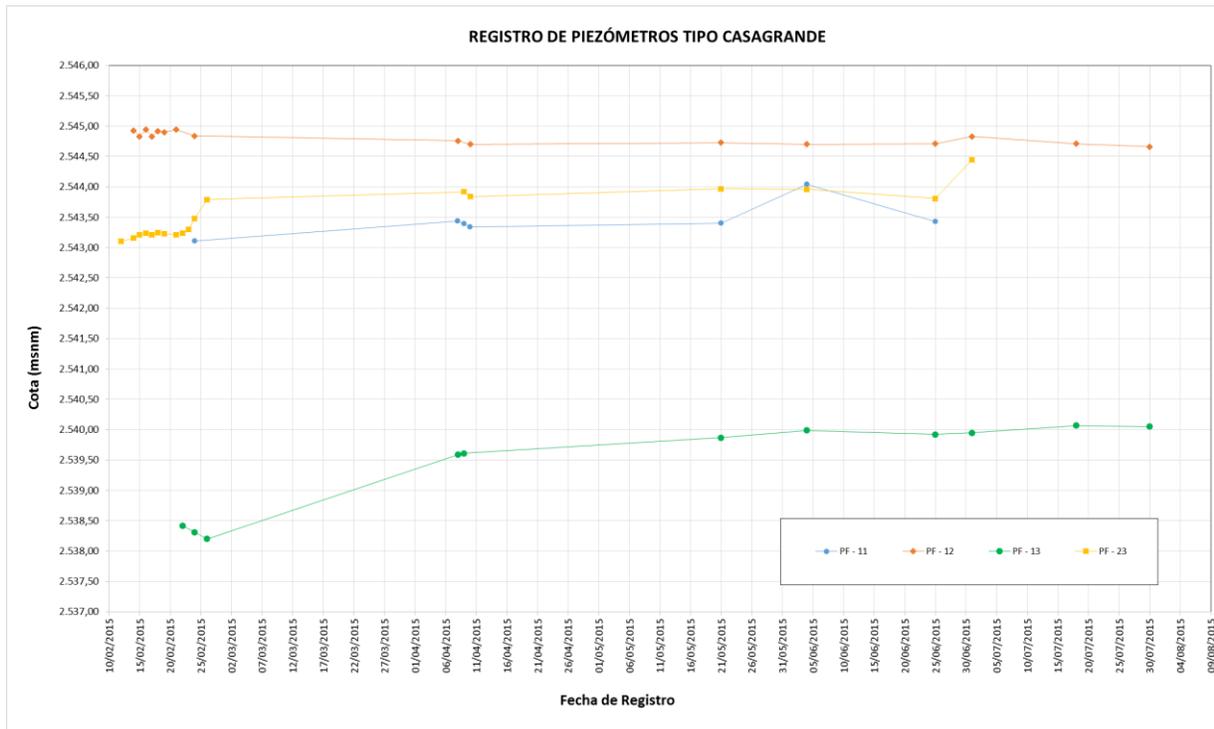
PIEZÓMETRO ABIERTO						
PIEZÓMETRO PF.	No. REGISTRO	FECHA	HORA	COTA SUPERFICIE DEL TERRENO (msnm)	LECTURA (m)	NIVEL (msnm)
	13	4/10/2015	2:20:00 PM		8,17	2542,9
	14	4/14/2015	10:35:00 AM		8,11	2542,96
	15	5/21/2015	10:15:00 AM		8,11	2542,96
	16	6/4/2015	11:15:00 AM		8,11	2542,96
	17	6/25/2015	11:23:00 AM		8,09	2542,98
	18	7/1/2015	10:45:00 AM		8,09	2542,98

8.3 Piezómetro tipo Casagrande

Los cuatro piezómetros de Casagrande se instalaron a una profundidad aproximada de 15 m, esta profundidad obedece al nivel de cimentación proyectada de las estructuras más grandes, siguiendo un alineamiento norte-sur desde la zona de los tanques Sedimentadores hasta la de los Espesadores, con el fin de poder obtener un registro de la presión del agua en la capa de suelo en la que se localiza.

En la Figura 8-4 se representa la variación del nivel freático en el tiempo según los registros de los niveles de estos piezómetros. Como se puede observar, el comportamiento es más definido con respecto al registrado en los piezómetros abiertos, con variaciones dentro un rango menor a 0,50 m. De acuerdo con el método de instalación, la tendencia en el comportamiento de los niveles de agua subterránea se presenta tendencias definidas en la medida en que se han depurado las posibles fallas presentadas durante las primeras lecturas.

Los niveles registrados en los piezómetros PF-11, PF-12 y PF-23 se encuentran entre las cotas 2543 a 2545, mientras que los niveles del PF-13 se encuentran entre la 2538,50 y la 2540 con tendencia a estabilizarse en esta última cota. Como se aprecia los niveles del piezómetro PF-13 son marcadamente inferiores a los tres restantes, situación que podría explicarse por la baja permeabilidad del material en la zona que no permite la recarga del nivel freático.

Figura 8-4 Lecturas de piezómetros Casagrande


Los datos utilizados para obtener dicha tendencia, se muestran en la Tabla 8-2 y corresponden a las lecturas realizadas desde la fecha de instalación hasta la última lectura realizada antes de la presentación de este informe.

Tabla 8-2 Registros de lectura piezómetros tipo Casagrande

PIEZÓMETRO CASAGRANDE						
PIEZÓMETRO PF.	No. REGISTRO	FECHA	HORA	COTA (msnm)	LECTURA (m)	NIVEL (msnm)
11	1	2/24/2015	10:00:00 AM	2552,11	9	2.543,11
	2	4/8/2015	11:15:00 AM		8,67	2.543,44
	3	4/9/2015	12:10:00 PM		8,72	2.543,39
	4	4/10/2015	2:20:00 PM		8,77	2.543,34
	5	5/21/2015	11:53:00 AM		8,71	2.543,40
	6	6/4/2015	11:57:00 AM		8,07	2.544,04
	7	6/25/2015	12:19:00 PM		8,68	2.543,43
12	1	2/14/2015	9:45:00 AM	2552,69	7,76	2.544,93
	2	2/15/2015	9:45:00 AM		7,86	2.544,83
	3	2/16/2015	10:40:00 AM		7,75	2.544,94
	4	2/17/2015	10:40:00 AM		7,86	2.544,83
	5	2/18/2015	10:40:00 AM		7,77	2.544,92
	6	2/19/2015	9:30:00 AM		7,79	2.544,90
	7	2/21/2015	10:00:00 AM		7,75	2.544,94
	8	2/24/2015	10:00:00 AM		7,85	2.544,84
	9	4/8/2015	11:30:00 AM		7,93	2.544,76
	10	4/10/2015	2:20:00 PM		7,99	2.544,70
	11	5/21/2015	11:15:00 AM		7,96	2.544,73
	12	6/4/2015	12:10:00 PM		7,99	2.544,7
	13	6/25/2015	12:10:00 PM		7,98	2.544,71
	14	7/1/2015	12:10:00 PM		7,86	2.544,83
	15	7/18/2015	10:00:00 AM		7,98	2.544,71
	16	7/30/2015	10:30:00 AM		8,03	2.544,66
13	1	2/22/2015	10:00:00 AM	2552,76	14,34	2.538,42
	2	2/24/2015	10:00:00 AM		14,45	2.538,31
	3	2/26/2015	10:00:00 AM		14,56	2.538,20
	4	4/8/2015	10:30:00 AM		13,17	2.539,59
	5	4/9/2015	11:05:00 AM		13,15	2.539,61
	6	5/21/2015	10:45:00 AM		12,89	2.539,87
	7	6/4/2015	11:45:00 AM		12,77	2.539,99
	8	6/25/2015	11:55:00 AM		12,84	2.539,92
	9	7/1/2015	11:10:00 AM		12,81	2.539,95
	10	7/18/2015	10:00:00 AM		12,69	2.540,07
	11	7/30/2015	10:30:00 AM		12,71	2.540,05
23	1	2/12/2015	10:15:00 AM	2553,06	9,96	2.543,10
	2	2/14/2015	9:30:00 AM		9,9	2.543,16
	3	2/15/2015	9:30:00 AM		9,85	2.543,21
	4	2/16/2015	10:40:00 AM		9,82	2.543,24
	5	2/17/2015	10:40:00 AM		9,85	2.543,21
	6	2/18/2015	10:40:00 AM		9,81	2.543,25
	7	2/19/2015	9:30:00 AM		9,83	2.543,23
	8	2/21/2015	10:00:00 AM		9,85	2.543,21
	9	2/22/2015	10:00:00 AM		9,82	2.543,24

PIEZÓMETRO CASAGRANDE						
PIEZÓMETRO PF.	No. REGISTRO	FECHA	HORA	COTA (msnm)	LECTURA (m)	NIVEL (msnm)
	10	2/23/2015	10:00:00 AM		9,76	2.543,30
	11	2/24/2015	10:00:00 AM		9,58	2.543,48
	12	2/26/2015	10:00:00 AM		9,27	2.543,79
	13	4/9/2015	9:55:00 AM		9,14	2.543,92
	14	4/10/2015	2:20:00 PM		9,22	2.543,84
	15	5/21/2015	10:30:00 AM		9,09	2.543,97
	16	6/4/2015	11:29:00 AM		9,1	2.543,96
	17	6/25/2015	11:42:00 AM		9,25	2543,81
	18	7/1/2015	11:10:00 AM		8,61	2544,45

Paralelamente con el programa de lecturas de piezómetros que se ha seguido, se han tomado también las lecturas de los piezómetros que se instalaron en la etapa preliminar (exploración geotécnica). Los resultados obtenidos en estas lecturas no se reportan en el presente informe. Sin embargo, dicha información ha servido de base en la determinación y caracterización de toda la zona de estudio.

El plano GE-00-254 muestra los niveles promedio de los registros tomados en cada piezómetro para la fecha de edición del presente informe. Como se aprecia en el plano los niveles se mantienen casi constantes, con fluctuaciones no mayores a 0,60 m, en casi toda la zona de trabajo de la PTAR Canoas.

Para la zona de Sedimentadores el nivel se mantiene entre las cotas 2539,45 y 2544,81, mientras que en la zona de Digestores los niveles promedio varían entre 2542,44 y 2545,55.

Se observan igualmente registros puntuales cuyos niveles no son asociables con alguna de las tendencias registradas en los demás piezómetros.

Adicionalmente en este plano se trazaron unos contornos, isolíneas del nivel freático, que muestran los piezómetros que registran valores promedio similares; esto con el fin de tener una representación gráfica que facilite la visualización de los datos.

Los piezómetros tipo Casagrande, que miden presiones puntuales, muestran que estas presiones tampoco han variado en el tiempo entre un punto u otro, lo que permite inferir que el comportamiento general del nivel freático es casi que constante u homogéneo en toda la zona de análisis.

En términos generales los registros de los niveles piezométricos indican que la posición promedio de la lámina de agua en la zona de Sedimentadores está en la cota 2543,20, mientras que en la zona de Espesadores se encuentra en la 2543,80.

Sección 9

Sistema de cimentación de estructuras

Como primer acercamiento a la ingeniería de detalle, y teniendo en cuenta los perfiles de suelo y los parámetros geotécnicos obtenidos en la exploración de campo para ingeniería de detalle se presenta una recomendación preliminar de los sistemas de cimentación.

Tabla 9-1 Sistema de cimentación recomendada

Estructura	Esfuerzo máximo a soportar * (t/m ²)	Sistema de cimentación recomendada	Mejoramiento del suelo
Cámara inicial	11,91	Losa de cimentación o pilotes dependiendo del límite de asentamientos permisibles	Zona de mejoramiento con material seleccionado
Cribado de pretratamiento	9,44	Losa de cimentación o pilotes dependiendo del límite de asentamientos permisibles	Zona de mejoramiento con material seleccionado
Desarenador de pretratamiento	16,48	Losa de cimentación o pilotes dependiendo del límite de asentamientos permisibles	Zona de mejoramiento con material seleccionado, y uso de inclusiones rígidas para control de asentamientos diferenciales
Mezcla rápida	12,72	Losa de cimentación o pilotes dependiendo del límite de asentamientos permisibles	Zona de mejoramiento con material seleccionado
Cadica general de sedimentadores	15,81	Losa de cimentación o pilotes dependiendo del límite de asentamientos permisibles	Zona de mejoramiento con material seleccionado
Cadica secundaria de sedimentadores	13,16	Losa de cimentación o pilotes dependiendo del límite de asentamientos permisibles	Zona de mejoramiento con material seleccionado
Sedimentadores	15,28	Losa de cimentación, extensión lateral de losa de cimentación para control de subpresión ejercida por el agua subterránea.	Zona de mejoramiento con material seleccionado.
Espesadores	12,39	Losa de cimentación	Zona de mejoramiento con material seleccionado
Digestores	40,48	Pilotes preexcavados y fundidos en sitio	Zona de mejoramiento con material seleccionado

*Esfuerzos generados por carga muerta, carga viva y asumiendo nivel de desbordamiento

9.1 Tipos de fundación y profundidades

En la Tabla 9-1 se presentó el sistema de cimentación preliminar. En el Producto 10 y 11 se presentarán las soluciones de cimentación detalladas para las diferentes estructuras de acuerdo con las condiciones de asentamientos permisibles para cada una de ellas de acuerdo con los requerimientos específicos del proyecto a nivel hidráulico y estructural.

9.1.1 Zapatas

Las zapatas se recomiendan para estructuras menores, como puntos de vigilancia, columnas de cerramiento de la PTAR, entre otras. Todas las zapatas deberán tener un ancho mínimo de 1 metro y estar empotradas al menos 1 metro por debajo de la superficie final del terreno.

Las zapatas deberán ser diseñadas para una capacidad admisible del suelo de 6,5 ton/m². Se esperan asentamientos totales menores de 2,5 cm y diferenciales de no más de 2,0 cm entre columnas adyacentes. No se descarta que para el uso de este sistema de fundación se requiera en algunos casos el mejoramiento del suelo, como por ejemplo incluir geosintéticos, o reemplazo del suelo por otros de mayor capacidad y menor compresibilidad.

9.1.2 Losa de fundación

De forma preliminar, se considera que el sistema de cimentación de los tanques desarenadores, mezcladores rápidos, sedimentadores primarios y secundarios, consistirá en losas de cimentación. Esta conceptualización se hace a partir de la evaluación de la magnitud de las cargas impuestas por las estructuras y la magnitud de las alturas de corte para llegar a la cota de rasante de diseño, como las profundidades de excavación para las estructuras. Estas condiciones llevan al diseño de estructuras semi enterradas, es decir, a cimentaciones compensadas total o parcialmente.

Para las estructuras más pesadas como sedimentadores y tanques de desarenación se deberá realizar un mejoramiento del suelo de espesor entre 1,0 y 1, 2 metros.

Los resultados de la exploración del subsuelo y las cargas asumidas de los tanques digestores indican que los suelos encontrados no son capaces de soportar las cargas asumidas por estos tanques mediante cimentaciones superficiales. Por esta razón, el Consorcio CDM Smith - INGESAM recomienda de forma preliminar cimentar estos tanques mediante el uso de pilotes pre-excavados y fundidos in situ.

Para minimizar la reducción de las capacidades admisibles de los pilotes individuales dentro de un grupo de pilotes, la separación horizontal de los pilotes deberán tener un mínimo de 3 veces el diámetro del pilote medido de centro a centro. En el caso tal que la separación de los pilotes sea menor a 3 veces el diámetro del pilote, será necesaria la aplicación de los factores de reducción de pilotes en grupo.

9.1.3 Sistema de drenajes

El Contratista será responsable del diseño e implementación del sistema de control de drenaje que mantendrá la subrasante seca y sin perturbaciones. Los sistemas de drenaje para el control del flujo del agua deberán ser diseñados tomando en cuenta la Sección H.8.2.2 del Código NSR-10.

Se anticipa que se requerirá sistemas de drenaje para las excavaciones propuestas. Para evitar la perturbación de la subrasante, el nivel freático debe ser mantenido por debajo de la subrasante durante todo el período de excavación y de colocación de rellenos. El drenaje del agua en las excavaciones puede consistir en bombas de agua, pozos, etc., capaces de bajar el nivel freático por debajo de nivel propuesto de excavación.

Se deberá tener cuidado de evitar la perturbación de los suelos de la subrasante limitando el tiempo que duren abiertas las excavaciones, inclinando el fondo de las excavaciones facilitando el drenaje, y proporcionando bermas para limitar que el agua drene hacia las excavaciones.

Adicionalmente, el material excavado que se vaya a reutilizar como material de relleno deberá ser apilado de tal manera que promueva que el agua drene y limite la saturación de los materiales y serán colocados a una distancia segura de las excavaciones.

Para conformación de terrazas se deberá implementar un sistema de recolección de aguas de escorrentía, como zanjas de coronación y cunetas, en la corona y en la pata de los taludes de corte. En todos los casos será necesario un sistema de bombeo superficial que desaloje el agua de uno o varios cárcamos en los que se recolecten los recubrimientos.

Sección 10

Estabilidad de los taludes de corte

La máxima altura del talud de corte temporal se estima que estará entre 5,0 y 6,5 m. Dadas las características de los materiales existentes en la zona de la PTAR Canoas se estableció la conformación de taludes con pendientes 1,5H:1,0V con la finalidad de evitar la implementación de algún sistema de contención durante la construcción. Bajo estas disposiciones se hicieron modelaciones con el software Geostudio 2012- Slope/W, y con las diferentes combinaciones de escenarios modelados se pudo corroborar que efectivamente con una inclinación 1,5H: 1,0V los taludes permanecen estables. Los factores de seguridad deben cumplir con lo dispuesto en el código NSR-10, Capítulo H.5.

En la Tabla 10-1 se presentan los factores de seguridad básicos mínimos para taludes durante construcción y diseño. Los factores de seguridad calculados para los taludes temporales cumplen con los valores mínimos indicados en esta tabla.

Tabla 10-1 Factores de seguridad (FS) básicos mínimos directos para el análisis de capacidad portante y estabilidad de taludes.

Condición	F _{SBM}		F _{SBMU}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga muerta + carga viva normal	1,50	1,25	1,80	1,40
Carga muerta + carga viva máxima	1,25	1,10	1,40	1,15
Carga muerta + carga viva normal + sismo de diseño seudo-estático	1,10	1,00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – condición estática y agua subterránea normal	1,50	1,25	1,80	1,40
Taludes – condición seudo-estática con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño	1,05	1,00 (*)	No se permite	No se permite

(*) Nota: Los parámetros sísmicos seudo-estáticos de construcción serán el 50% de los de diseño

Fuente: NSR-10 Capítulo H, estudios geotécnicos. NSR -10. Tabla H.2.4-1

Para la modelación se definieron parámetros geotécnicos característicos obtenidos a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio ejecutados. Se identificaron las capas de suelo que intervendrán en las secciones de corte y se definieron las propiedades más representativas para las condiciones de exposición del material. Posteriormente se realizó el análisis de estabilidad evaluando que el Factor de Seguridad cumpliera con los valores mínimos indicados en la NSR-10 (ver Tabla 10-4)

Los materiales que intervendrán en los cortes corresponden a las Capas 1, 2 y 3. La resistencia al corte asignada a las capas de suelos 1, 2 y 3 en toda la Fase I se obtuvo en forma estadística a partir de un análisis por percentiles, empleando la base de datos de todos los resultados de corte directo y compresión simple realizados en todo el área de la Fase I para las capas de interés (ver la Tabla 10-2 y la Tabla 10-3)

Tabla 10-2 Parámetros característicos promedio de las capas 1,2 y 3.

Material	Profundidad (m)	γ_t (ton/m ³)	ϕ' (°)	C' (kPa)
Capa 1: Limo arcilloso con presencia de raíces y oxidaciones y fuertemente consolidada	0,0 – 3,0	1,363	24	26
Capa 2: Arcilla limosa, gris habana de alta plasticidad, sobreconsolidada, con presencia de planos de oxidados y lentes areno limosos.	3,0 – 7,0	1,640	23	27
Capa 3: Arcilla limosa habana de alta plasticidad, ligeramente sobreconsolidada, con lentes de arena limosa y concreciones de óxido de hierro	7,0 – 11,0	1,917	22	26

Estos valores corresponden a los mejores estimados mediante análisis de percentiles. Sin embargo, se evaluó el comportamiento carga deformación en las muestras ensayadas a compresión simple observando que estas capas superficiales presentan fisuras, que las propiedades de resistencia al corte disminuyen en estas muestras, y que al estar expuesto este material tenderá a presentar fisuramiento por exposición y cambio de humedades. Bajo estas consideraciones se reasignaron los valores de las propiedades del suelo a intervenir en los cortes. La **Tabla 10-3** presenta la resistencia al corte empleada en cada material.

Tabla 10-3 Parámetros asignados en la modelación de estabilidad de taludes, con $\phi=0$

Material	Profundidad (m)	γ_t (ton/m ³)	c' (kPa)
Capa 1: Limo arcilloso con presencia de raíces y oxidaciones y fuertemente consolidada	0,0 – 3,0	1,363	17.9
Capa 2: Arcilla limosa, gris habana de alta plasticidad, sobreconsolidada, con presencia de planos de oxidados y lentes areno limosos.	3,0 – 7,0	1,640	37
Capa 3: Arcilla limosa habana de alta plasticidad, ligeramente sobreconsolidada, con lentes de arena limosa y concreciones de óxido de hierro	7,0 – 11,0	1,917	40

Las condiciones del análisis han contemplado cuatro escenarios distintos:

- Talud de 5 m de altura, con inclinación 1,5:1,0, condición saturada.
- La misma situación anterior adicionando una sobrecarga de 50 kN/m³.
- La situación inicial bajo condiciones dinámicas, aceleración horizontal $a_a = 0,15$, y aceleración vertical $a_v = 0,02$.
- Por último la combinación de las dos últimas condiciones.

Bajo las condiciones mencionadas antes, el Factor de Seguridad para los taludes siempre fue superior a los valores establecidos en la Norma para taludes temporales, siendo mayor en la condición inicial y el mínimo en la condición final. Los análisis se realizaron con el método Bishop; se muestran los resultados de los análisis derivados por este método en condición dinámica saturada + sobrecarga. Ver Figura 10-1 y la Figura 10-2.

Figura 10-1 Imagen del modelo analizado por el método de Bishop con superficie de falla circular

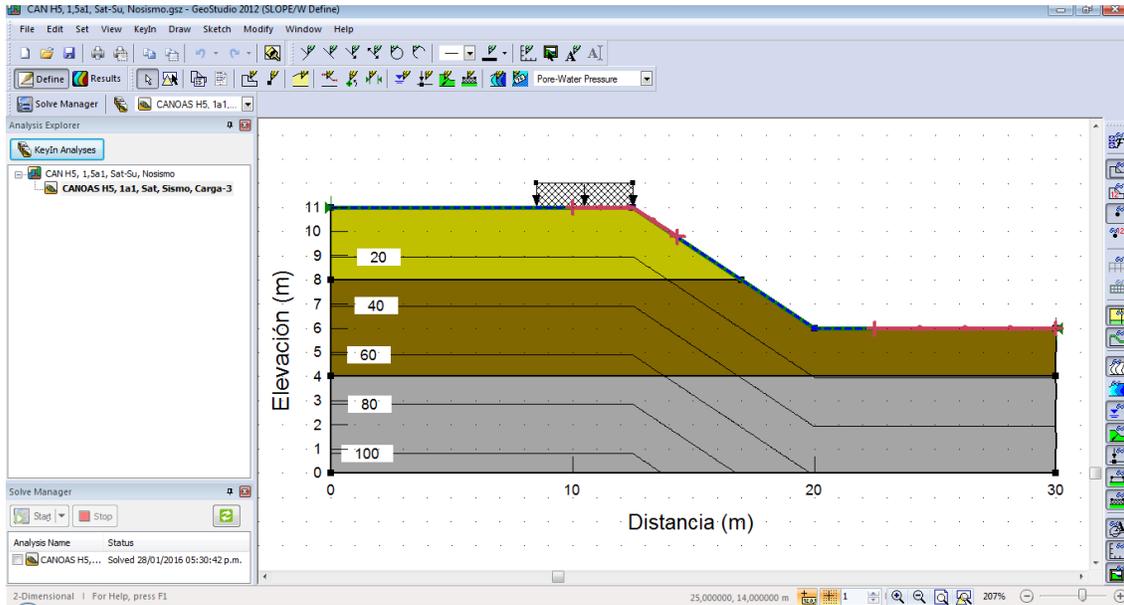


Figura 10-2 Factor de seguridad obtenido por el método de Bishop con superficie de falla circular bajo condiciones dinámicas, saturado y con sobrecarga

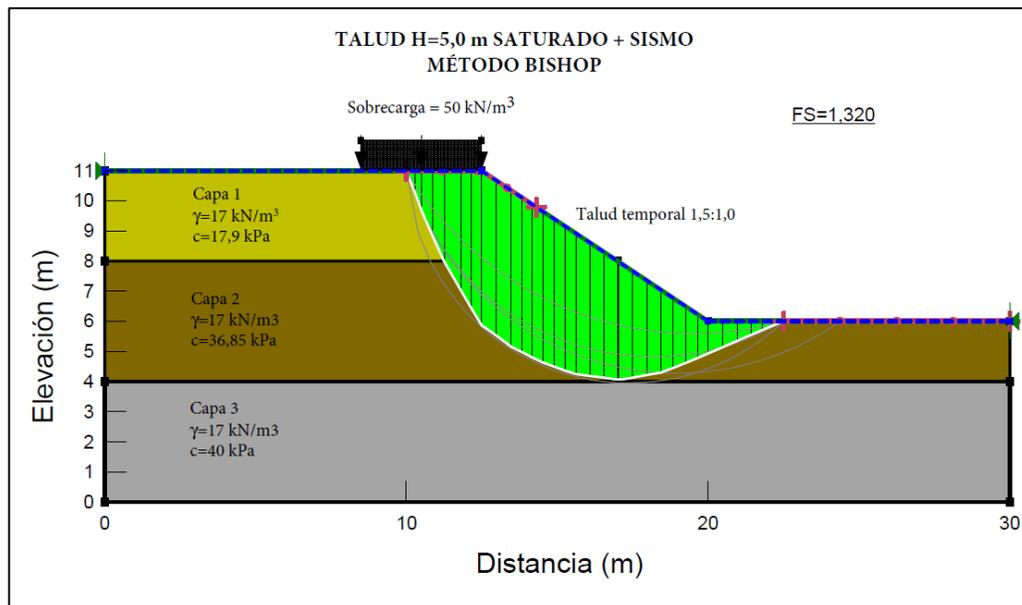


Tabla 10-4 Factores de seguridad obtenidos en el análisis de estabilidad de taludes bajo condiciones críticas.

Condición de análisis del talud	Factor de seguridad obtenido talud 1,5H: 1,0V	NSR -10 Factor de seguridad básico mínimo directo (diseño)
Seudo-estática con agua subterránea y coeficiente sísmico de diseño.	1,32	1,0

Como ejercicio de verificación se realizaron análisis para taludes de altura hasta de 7 m y bajo los escenarios indicados. Los resultados obtenidos mostraron que con una inclinación de talud 1,5H: 1,0V estos presentan factores de seguridad superiores a los solicitados en la normatividad. Sin embargo, se reitera que los análisis realizados se hicieron asumiendo cortes con altura máxima de siete metros e inclinación 1,5H: 1,0V, y que de ser necesarios cortes de mayor altura o mayor inclinación estos deberán diseñarse por cuenta del CONTRATISTA para garantizar la estabilidad de los mismos.

En la Tabla 10-5 se muestran los factores de seguridad obtenidos con el software GeoSlope/W y los factores de seguridad mínimos según la NSR-10. Sin embargo, dadas las condiciones del material se recomienda que para los taludes que superen los 7 m de altura se adopten algunas medidas adicionales como por ejemplo la conformación de bermas intermedias. En este sentido el Contratista deberá realizar los análisis de estabilidad respectivos.

Tabla 10-5 Factores de seguridad para taludes 1,5 H: 1,0V y altura de 7 m.

Altura del talud (m)	Inclinación (H:V)	Saturado	Sismo a=0,15	Sobrecarga 50kPa	Método de análisis	Factor de seguridad	Factor de seguridad NSR-10
5	1,5:1	X	X	X	Bishop	1.32	1
5	1,5:1	X		X	Bishop	1.57	1.25
7	1,5:1	X	X	X	Bishop	1.60	1.05
7	1,5:1	X		X	Bishop	2.38	1.5

Sección 11

Conclusiones

En el presente Producto 7. Trabajos de campo para ingeniería de detalle se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Visitas de campo por parte del equipo de geotecnia tanto del cliente, la interventoría y la Consultoría
- La profundidad y localización de los puntos de exploración correspondió estrictamente a la ubicación de las estructuras hidráulicas, edificios, obras civiles como: excavaciones contempladas para la etapa de construcción (temporales), cortes para conformación de taludes permanentes y vías de acceso. De acuerdo con la distribución espacial de las estructuras, geometría y formas, éstas se agruparon espacialmente con el objetivo de optimizar la campaña de exploración. En total para el Producto 7 se perforaron 1289,15 metros en terreno, 1260,7 en suelo y 28,45 metros en roca meteorizada. El programa de exploración contempló:
 - 22 Perforaciones mecánicas con profundidades variables entre 50 y 59 m.
 - 29 Perforaciones mecánicas con profundidades variables entre 10 y 15 m.
 - 16 perforaciones mecánicas entre 5 y 8 m de profundidad sobre el lecho del Rio Bogotá.
 - 11 trincheras en ambas márgenes del rio Bogotá con profundidades entre 1,4 m a 2,2 m.
 - 15 Sondeos con CPTu (Cone Penetration Test-undrained) con profundidades entre 15 y 45 m de profundidad con medición de disipación de presión de poros.
 - 7 sondeos con Dilatómetro plano de Marchetti (DMT) con profundidades entre 20 y 41 m.
 - 1 línea de refracción sísmica de 235 m de longitud.
 - 6 ensayos Down Hole con profundidades entre 19.6 y 30 m de profundidad.
 - 14 piezómetros: 10 de tubo abierto y 4 tipo Casagrande, entre 14 y 21 m de profundidad.
- Ejecución de ensayos de laboratorio y campo para la caracterización detallada de los materiales explorados.
- Caracterización geotécnica detallada del perfil estratigráfico promedio de la Fase I.
- Elaboración de 12 perfiles estratigráficos en la zona de la Fase I de la PTAR Canoas.
- Analizada toda la información geotécnica y geológica (perforaciones, ensayos de campo, resultados de ensayos de laboratorio, reconocimiento de campo) obtenida en las diferentes etapas de ingeniería se definió un perfil geotécnico generalizado del subsuelo para la Fase I de la PTAR Canoas. Este perfil está compuesto por ocho capas de materiales arcillo limosos y lentes de arena fina dispuestos en dos terrazas: Terraza superior de acumulación por erosión en cercanía

al afloramiento de la Formación Guadalupe que aflora en el costado Occidental del predio y una Terraza inferior de inundación y acumulación del río Bogotá. En promedio el espesor del depósito de suelo (ocho capas) es de 45 a 50 metros, que descansan sobre una arcillolita verde meteorizada detectada entre los 45 y 55 metros de profundidad.

- Capa 1: Limo arcilloso con presencia de raíces y oxidaciones y fuertemente consolidada este material se encuentra entre los 0,5 m y 4,0 m de profundidad en el área general de la PTAR.
 - Capa 2: Arcilla limosa, gris habana de alta plasticidad, sobreconsolidada, con presencia de planos de oxidados y lentes arena limosos. Esta capa tiene un espesor que varía entre los 4 y 12 m.
 - Capa 3: Arcilla limosa habana de alta plasticidad, ligeramente sobreconsolidada, con lentes de arena limosa y concreciones de óxido de hierro. Con un espesor entre 2 y 7m.
 - Capa 4: Arcilla limosa, gris clara con presencia de fisuración, esta capa está ligeramente sobreconsolidada. Con un espesor variable entre 1 y 9 m. Esta capa se localiza particularmente en la zona norte de los 16 tanques sedimentadores.
 - Capa 5: Arcilla limosa gris oscura con lentes de arena. Con un espesor entre 7 y 14 m.
 - Capa 6: Arena fina limosa gris con lentes de materia orgánica. Con un espesor promedio de 1 y 2 m. Esta capa de arena se detectó particularmente en la zona de los sedimentadores 1 y 4.
 - Capa 7: Limo orgánico y arcillas limosas de color gris oscuro, con lentes continuos de arena. Estos materiales se encuentran interdigitados y esta disposición se asocia con los procesos de divagación, inundación y acumulación del río Bogotá. Esta capa tiene un espesor entre 4 y 11 m en toda el área de la PTAR Canoas – Fase I.
 - Capa 8: Arcilla limosa gris clara, con presencia de lentes de arena, con espesor entre 2 y 12 m. Con menores espesores en la cercanía a la Formación Arenisca Labor y Tierna.
 - Capa 9: Arcillolita meteorizada de color verde. Este material se detectó en profundidades variables entre los 45 y 55 metros de profundidad. Este buza en sentido occidente – oriente. Sin embargo, no se detectó en todas las perforaciones profundas.
- Se presenta una primera estimación detallada del sistema de cimentación para las diferentes estructuras de la Fase I. Sin embargo, estas soluciones están estrechamente relacionadas con los límites de asentamientos totales y diferenciales permisibles de las diferentes estructuras.
 - Análisis de lecturas de piezómetros instalados en la zona.
 - Análisis de estabilidad de los taludes de corte temporales que se proyectan ejecutar en la PTAR FASE I.