

Caracterización geotécnica de trazados de perforación horizontal dirigida mediante ensayos geofísicos en zonas de alta complejidad geológica y deslizamientos

Carlos Buenahora¹, Pablo Salamanca², Antonio Martínez Graña³ and Daniel Galvis⁴

^{1,2,4} Ingeotecnia, Floridablanca, Santander, Colombia.

³ USAL, Salamanca, España

ABSTRACT

En agosto de 2021 se presentaron deslizamientos de tierra en la ladera del sector de Cortinas en una extensión de más de tres kilómetros, los cuales afectaron torres eléctricas, una vía vehicular nacional, un oleoducto y un gasoducto. Actualmente dichas infraestructuras tienen limitación en su operación, generando pérdidas económicas importantes y por tanto para el caso del gasoducto, se plantea la construcción de un PHD de dos mil metros de longitud a profundidades de hasta cien metros, con el propósito de poder eludir las zonas inestables y reestablecer el transporte a condiciones normales. El diseño y construcción de dicha obra, constituye un reto, puesto que la zona del proyecto tiene condiciones geológicas muy especiales, ya que los depósitos de ladera son muy susceptibles a fallar y existe aparentemente un tensor de esfuerzos de una falla activa que afecta directamente la estabilidad de la zona. El PHD proyectado atraviesa una quebrada y una ladera con topografía abrupta con difícil acceso, así como diferentes mantos de roca sedimentaria con intercalaciones, que se encuentran plegadas y muy fracturadas y con saturación de agua. Dichas condiciones especiales, generaron dificultades y se opusieron a la culminación de varios intentos de otros PHD, pero teniendo en cuenta que esta alternativa constituye básicamente la única solución desde el punto de vista técnico, se hizo necesario realizar algunas perforaciones profundas y múltiples ensayos geofísicos sísmicos y geoeléctricos que permitieran definir un perfil estratigráfico detallado para poder analizar la viabilidad constructiva y en caso tal el método más apropiado, así como la caracterización geomecánica de las rocas, ya que según las modelaciones numéricas indican que la estabilidad de la perforación se puede ver afectada por plastificación en los límites de esta, con desprendimientos de fragmentos de roca y atascamiento de las herramientas necesarias para su construcción.

Keywords: Geofísica; oil&gas; perforación horizontal dirigida; geología; elementos finitos; línea sísmica, sondeo eléctrico vertical, tomografía eléctrica.

1. Introducción

El transporte en un país como Colombia siempre ha sido un reto, teniendo en cuenta la topografía, donde hay valles y sabanas tanto como páramos y nevados a lo largo de tres cordilleras que cruzan el país. Y no solo en cuanto a transporte de carga o personas, sino en líneas de transporte dentro del sector oil&gas. Sobre la cordillera oriental existe un sector al sur del departamento de Norte de Santander por donde cruzan distintos ductos, los cuales desde sus fases de prefactibilidad hasta su construcción y mantenimiento han atravesado grandes retos y se ha logrado durante años el transporte de materias primas a través de estas líneas desde el oriente del país hasta grandes industrias y puertos y distribución en general. En agosto de 2021 se presentaron una serie de deslizamientos que afectaron la operación de los ductos, de inmediato se pusieron en marcha estudios de análisis para determinar las causas y posibles soluciones.

En los estudios se concluyó que los eventos naturales que se presentaron, se asemejan entre sí en que cuentan con las mismas condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas, incluso en que han sido sometidos a

cambios graduales tales como la condición del uso del suelo y los cambios derivados el deterioro geotécnico acumulado que en el transcurso tiempo, cuyo efecto, también gradual, se manifiesta en la disminución de los parámetros de resistencia mecánica del suelo; igualmente se asemejaron en su magnitud y en el mismo carácter súbito en que se dio la falla del terreno. Adicionalmente, estuvieron bajo los efectos del factor detonante “lluvia” que presentó precipitación superior a los 200 mm, comportamiento que periódicamente, cada cuatro años, se venía manifestando desde los últimos 16 años.

No obstante, lo que diferencia a estos eventos de otros que se hayan presentado en la región es su particular simultaneidad. Esto es explicado por el hecho de que la variación de la magnitud de los factores condicionantes en que se encontraban y la magnitud del factor detonante lluvia, confluyeron en la medida necesaria para que el riesgo alcanzara niveles que superaron la capacidad de resistencia del terreno y se diera, en consecuencia, el fenómeno natural con las características que presentó. La probabilidad de predecir tal confluencia es sumamente baja ya que considera una gran cantidad de variables aleatorias (volumen acumulado, número de días de

lluvias precedentes, máximo valor de lluvia en 24 horas, magnitud del sismo, entre otros).

Es muy importante tener en cuenta que las fallas presentadas en los derechos de vía de los ductos no se iniciaron en estos mismos, sino desde la parte alta de las laderas e incluso a varios cientos de metros arriba y con el aumento de la inercia del material movido bajo las lluvias extremas y debilitamiento de toda la ladera arrastrando los ductos incluso más de 150 metros en algunos sectores.

Con base en los hallazgos mencionados anteriormente se concluyó que predecir y/o contener situaciones y eventos como los presentados es técnica y económicamente inviable. Sin embargo, el objetivo continúa siendo la búsqueda de soluciones que permitan mantener la integridad de las líneas de transporte y dar continuidad a su operación.

En uno de los sectores con mayor afectación y donde coinciden dos importantes ductos fueron analizadas distintas alternativas de trazados que permitieran eludir las zonas de afectación y reubicar el ducto con los menores riesgos posibles. Esto tuvo en cuenta distintas variables tanto directas como indirectas, así como el hecho de encontrarse en cercanías a una quebrada y la existencia de zonas indígenas protegidas. El resultado del análisis de estas alternativas fue que la propuesta más viable es una perforación horizontal dirigida (PHD) de aproximadamente 2.0 km de longitud y por la variabilidad en la topografía, alcanza profundidades de hasta 100 metros con respecto a la superficie.

2. Área de estudio

El lugar en el que se encuentra ubicada el área afectada se encuentra en el corregimiento de Samoré, entre las veredas Troya y Cortinas del municipio de Toledo, Norte de Santander. Sobre el sector occidental en la parte baja de la ladera se encuentra la quebrada La China con un flujo constante y representativo de agua. El sector se cataloga como una zona ondulada y con escarpes pronunciados producto de las características litológicas de las formaciones geológicas. Allí se observan evidencias de procesos de meteorización, erosión y transporte por medios pluviales o gravitacionales (deslizamientos) que transformaron, remodelaron y en algunos casos dejaron rastros de geformas preexistentes.

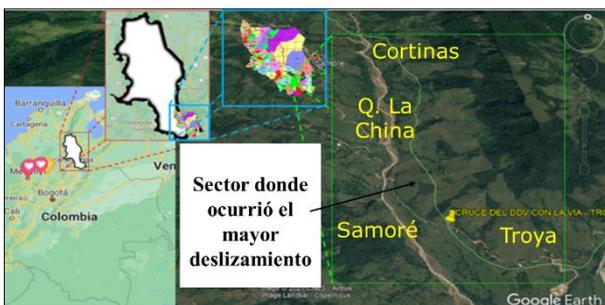


Figure 1. Área de estudio, Modificado de Google Earth.

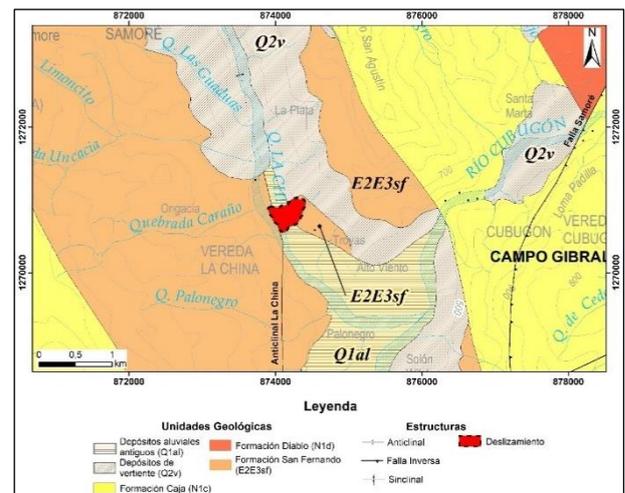
3. Geología

El territorio colombiano se encuentra localizado en la región noroccidental de la placa suramericana, en interacción constante con las placas de Nasca, Caribe, Cocos y otras regiones menores. La condición actual de convergencia, especialmente entre las placas de Nazcas, suramericana y Caribe, es la responsable de la intensidad de los procesos tectónicos activos actuales, como la subducción que dio origen a la orogenia andina durante el cenozoico, el crecimiento de las cordilleras, las cuencas y las cadenas volcánicas y la intensa actividad sísmica.

La zona del deslizamiento de manera muy regional se sitúa geológicamente sobre el flanco nororiental de la Cordillera Oriental de Colombia, se compone de rocas de basamento ígneo – metamórfico, de edades Precámbrico a Paleozoico y suprayaciendo a las anteriores, rocas sedimentarias con edades Mesozoicas a Cenozoicas de la Cuenca de Maracaibo y la subcuenca del Borde Llanero, además, de sedimentos no consolidados del Cuaternario.

3.1. Geología regional

Teniendo en cuenta la información disponible por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en sus planchas geológicas, la zona del deslizamiento comprende rocas y depósitos de la Cordillera Oriental y de las cuencas de Maracaibo y la subcuenca del Borde Llanero como se observa en la Figura 2. El sector litológicamente presenta rocas sedimentarias de las formaciones San Fernando (E_3N_3sf), Diablo (N_1d) y depósitos de vertientes (Q_2v) y aluviales antiguos (Q_1al). Estas formaciones se encuentran deformadas formando estructuras anticlinales y sinclinales (anticlinal de La China y sinclinal de Los Deseos), que encuentran fracturados por la actividad de sistemas de fallas inversas, como es la falla de Samoré y locales.



- Q1al** Depósitos aluviales antiguos: Depósitos de las corrientes con geformas de terrazas en niveles topográficos por encima del cauce actual, compuestos por gravas, bloques, arenas mal seleccionados en una matriz lodo arenosa y en menor proporción arcillas y lodos. Muestran gradación inversa aparente en las partes proximales.
 Edad: Holoceno
- Q2v** Depósitos de vertiente: Fragmentos de rocas no consolidados, con clastos heterométricos de formas subangulares a angulares, poco transportados y acumulados a lo largo de una pendiente o en cauces con aportes de las laderas, en zonas con inestabilidad del terreno.
 Edad: Holoceno

- N1c** **Formación Caja (Formación Guayabo):** Capas discontinuas de areniscas de grano fino a medio, de composición cuarzosa, estructura tabular plana paralela continua con estratificación laminar y en algunos sectores ondulada, con capas centimétricas de lodolitas y arcillolitas; ocasionalmente niveles de conglomerados.
 Edad: Mioceno Tardío (Montoya *et al.*, 2013).
 Equivalente en edad a la Formación Guayabo.
- N1d** **Formación Diablo (Formación Guayabo):** Cuarzoareniscas blanco amarillentas, de grano medio a grueso, en capas muy gruesas, con lentes de conglomerados con cantos de cuarzo, e intercalaciones de arcillolitas grises y limolitas síliceas en capas delgadas, esporádicamente se encuentran capas decimétricas de carbón.
 Edad: Mioceno Temprano (Plancha 154 - Hato Corozal, González *et al.*, 2015).
 Equivalente en edad a la Formación Guayabo.
- E2E3sf** **Formación San Fernando (Formación León):** Arcillolitas grises y cuarzoarenitas de grano medio a grueso, en estratos de capas medias a gruesas, con estratificación cruzada. En la parte inferior y media, se presentan esporádicos lentes de carbón.
 Edad: Eoceno Superior a Oligoceno Inferior. Equivalente en edad a la Formación Guayabo. (Plancha 154 - Hato Corozal, González *et al.*, 2015).

Figure 2. Mapa geológico regional, Tomado y modificado de (SGC, 2015a).

3.2. Geología estructural

El área del proyecto se encuentra ubicada en el piedemonte de la Cordillera Oriental, donde afloran rocas sedimentarias del Paleógeno y Neógeno con litologías que varían entre arcillolitas, limolitas y areniscas, además de depósitos coluviales y aluviales del Cuaternario. Las unidades geológicas corresponden a las formaciones San Fernando, Diablo y Caja. Desde el punto de vista de deformación, estas rocas sedimentarias se encuentran afectadas con pliegues y fallas, en un estilo estructural de piel delgada bajo un régimen de esfuerzos compresivo.

3.2.1. Pliegues y Fallas

A partir de información de referencia, de visitas a campo por parte de especialistas en geología, de descripción de muestras tomadas en campo y del análisis a 13 estaciones en zonas cercanas se describieron las estructuras geológicas presentes en la zona de estudio. En las cuales destacan el anticlinal La China, el sinclinal Los Deseos, la falla Samoré, la falla Loma de San José y diaclasas – tensor de esfuerzos.

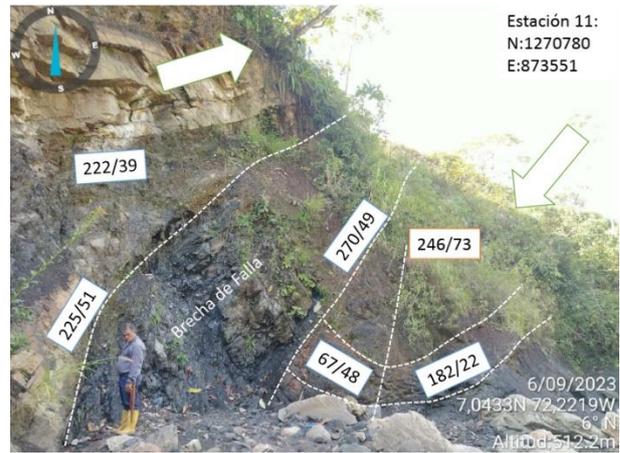
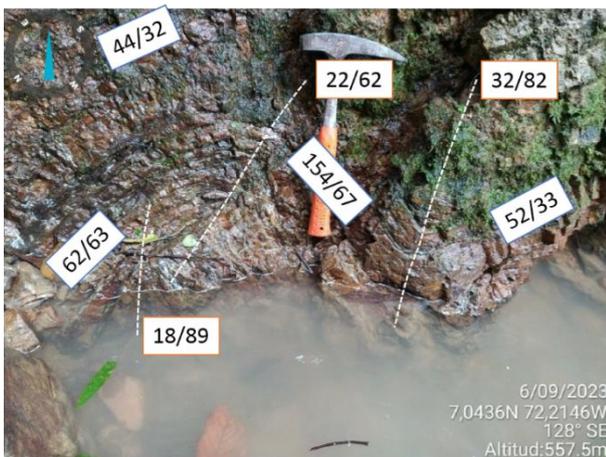


Figure 3. Pliegues de segundo orden en el flanco oriental del Anticlinal La China. / Planos y brecha de fallas que afectan la Formación San Fernando.

3.2.2. Diaclasas – tensor de esfuerzos

Los planos de fracturas medidos en las estaciones de campo se proyectan en la red estereográfica para ver en conjunto sus rumbos e inclinaciones (Figura 3). De este diagrama es posible identificar cuatro familias de diaclasas, con direcciones SW-NE, NW-SE, SSE-NNW y W-E. Esta proyección resalta la relación de fracturas conjugadas de las dos primeras familias (separadas aproximadamente 60°) por lo que se clasifican como fracturas de cizalla, con una bisectriz aproximada en dirección W-E, que se puede relacionar con un esfuerzo horizontal máximo o tensor de esfuerzos, que en este caso corresponde a σ_1 , considerando el tipo de estructuras que predominan en la zona: pliegues y fallas inversas. Además de las diaclasas conjugadas, se distinguen fracturas paralelas al tensor (W-E) y otras casi perpendiculares (SSE-NNW) que pueden corresponder con planos de clivaje.

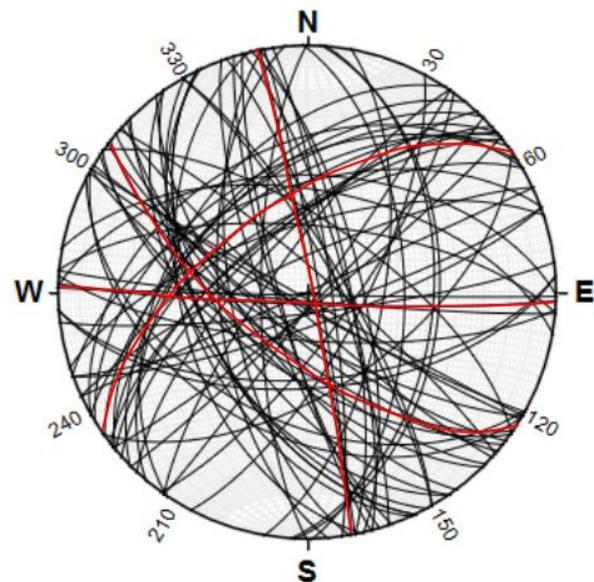


Figure 4. Proyección estereográfica de los planos de diaclasas medidos en areniscas de la Formación Diablo y en lodolitas y areniscas de la Formación San Fernando.

Para confirmar la relación geométrica de las fracturas y la orientación del tensor de esfuerzos se seleccionan los planos medidos en areniscas de la Formación Diablo ya que esta litología se deforma en frágil ante un campo de esfuerzos, expresando de manera más nítida los principios Andersonianos de fractura (Ley de Anderson).

Al procesar sólo los datos de las estaciones 5 y 6, ubicadas en el bloque yacente de la Falla se exponen las dos familias conjugadas, con las cuales es posible confirmar el tensor de esfuerzos W-E. Este tensor explica las diaclasas W-E como fracturas de tensión o abiertas y los planos NNW como planos cerrados con ligero componente de rumbo sinistral.

3.3. Geología local

Teniendo en cuenta la geología regional, geomorfología, ensayos de exploración e información de campo y secundaria, se describe la geología superficial, la cual, hace referencia tanto al suelo como a la roca expuestos y subsuperficiales clasificados desde el punto de vista ingenieril. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, en la zona se encontraron y se reconocieron principalmente, suelos transportados coluviales. Adicionalmente, en las proximidades se encontraron suelos transportados aluviales, suelos transportados fluviotorrenciales y rocas de calidad mala de las lutitas y areniscas de la Formación San Fernando.

La roca presenta diferentes grados de meteorización y poca variedad litológica, se trata de una secuencia monótona de lodolitas con tonalidad gris oscuro, en algunas perforaciones se reportan algunas capas medias a gruesas de limolita gris claro a partir de los 65m de profundidad. Es común la presencia de discontinuidades, el RQD es menor al 50% en casi la totalidad de la exploración geotécnica directa en roca, luego hay un ligero aumento del RQD hasta los 100m de profundidad. Lo anterior indica que la calidad del macizo rocoso investigado es de mala a regular.

El rasgo geológico más relevante a partir de la descripción litológica de los núcleos es la presencia de planos de falla que se identificaron a lo largo de las perforaciones más profundas, desde los 38m hasta los 99m y desde los 34m hasta 94m. Estos planos tienen un lustre característico por lo que también se les denomina espejos de falla y es producto de la formación de nuevos minerales por el alto cizallamiento que se desarrolla en estas superficies. En varios de estos planos se observan estrías de fricción que conforman hendiduras o líneas paralelas muy delgadas que se forman por la fricción entre los bloques de roca al momento de desplazarse. Adicionalmente se identificaron algunos escalones de corte, que constituyen pequeños saltos o desniveles también asociados al tectonismo. En la Figura 5 se muestran algunos ejemplos de las superficies de falla.



Figure 5. Superficies de corte núcleos encontrados.

4. Exploración geotécnica

Desde el año 2021 cuando ocurrieron los deslizamientos y fallas en los ductos, se han ejecutado distintas campañas de exploración que han permitido caracterizar y analizar la viabilidad para las distintas alternativas de variantes para reconexión.

4.1. Exploración geotécnica directa

En la Figura 6 se muestran las perforaciones SPT que han sido ejecutadas en el área de estudio.

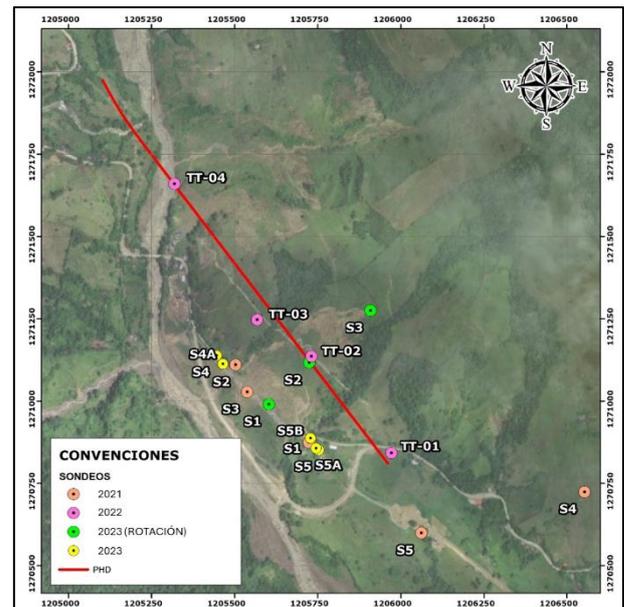


Figure 6. Sondeos realizados área de estudio, 2021 - 2023.

En la siguiente tabla se muestra un breve resumen de la descripción de los materiales encontrados en las perforaciones de mayor profundidad.

Table 1. Resumen de algunas perforaciones.

Sondeo	Profundidad		Descripción
	Desde (m)	Hasta (m)	
TT-02	0.0	34.5	Depósito de vertientes (Q2v): Bloques heterométricos de arenisca, subangulares y

Sondeo	Profundidad		Descripción
	Desde (m)	Hasta (m)	
TT-03			angulares, con diámetros entre 8 a 50 cm, en una matriz arcillo arenosa con gravas de tamaño entre 5 mm a 5 cm.
	34.5	59.0	Lodolita movilizada gris a negra muy fracturada y frágil.
	59.0	100.0	Lodolita gris y negra fracturada con algunas intercalaciones de limolita más competente (E2E3sf).
	0.0	7.0	Depósito de vertientes (Q2v): Bloques heterométricos de arenisca, subangulares y angulares, con diámetros entre 8 a 50 cm, en una matriz arcillo arenosa con gravas de tamaño entre 5 mm a 5 cm.
	7.0	9.0	Suelo residual de la formación San Fernando.
	9.0	56.0	Lodolita movilizada gris a negra muy fracturada y frágil.
	56.4	100.0	Lodolita gris y negra fracturada con algunas intercalaciones de limolita más competente (E2E3sf).

geofísica. Su principio fundamental se basa en la medición de los tiempos de viaje de ondas sísmicas generadas por una fuente impulsiva en la superficie del subsuelo (o cercana a ella) y que son refractadas en las interfaces entre medios (refractores) con propiedades físicas (i.e. impedancias acústicas) diferentes. El análisis de dichos tiempos de viaje, bajo ciertas hipótesis definidas y siguiendo las leyes de la propagación de ondas, permite en principio obtener un perfil en profundidad de la distribución geométrica de los diferentes refractores, con las correspondientes velocidades a las cuales la onda sísmica se propaga a través de ellos (Redpath, 1973).

En la siguiente imagen se muestra el resultado de una de las líneas sísmicas ejecutadas, mostrando las distintas zonas estratigráficas y sus respectivas descripciones.

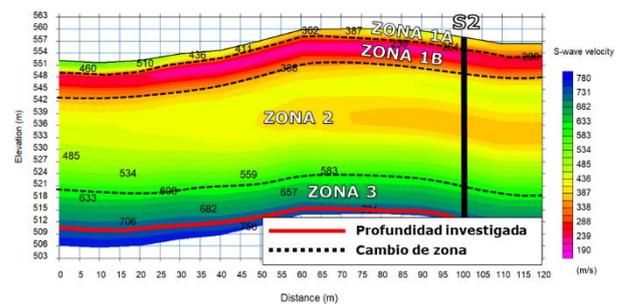


Figure 8. Ejemplo de resultado de línea sísmica.

4.2. Exploración geotécnica indirecta

Así mismo, la importancia de la exploración geotécnica indirecta fue fundamental para complementar los estudios, algunos de los estudios geofísicos ejecutados se muestran en la siguiente figura.

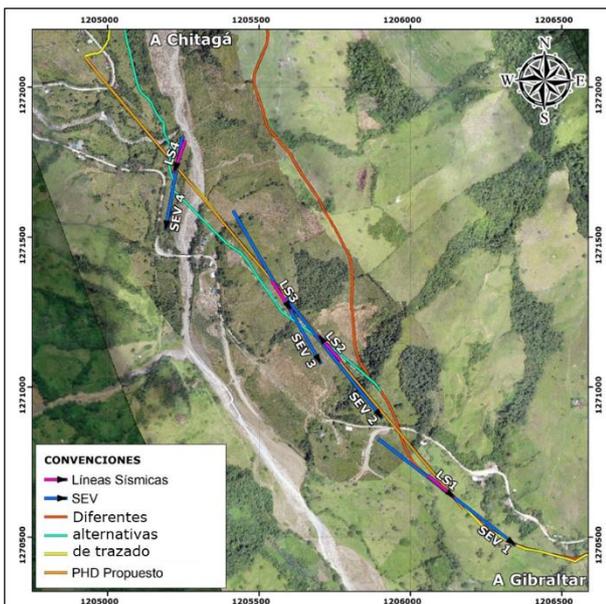


Figure 7. Geofísica realizada área de estudio.

4.2.1. Líneas sísmicas

La sísmica de refracción constituye uno de los métodos de prospección más tradicionales de la

La **zona 1** presenta velocidades de onda de corte (V_s) entre 200 y 510 m/s, y velocidades de onda compresionales (V_p) entre 400 y 600 m/s; de rigidez baja a media con un espesor aproximado de 10.0 metros, el estrato medio inferior posiblemente con mayor grado de humedad (colores naranjas a rojos). En la **Zona 1A** se evidencian unos aumentos de velocidades asociadas a fragmentos de roca o bloques del Coluvial reciente. La **zona 1B** se asocia a los materiales coluviales compuestos por arcillas arenosas con gravas y fragmentos de bloques.

La **zona 2** presenta velocidades de onda de corte (V_s) entre 400 y 600 m/s, y velocidades de onda compresionales (V_p) entre 600 y 1400 m/s; se asocia a intercalaciones de areniscas, lutitas y limolitas muy fracturadas con suelos residuales de formación San Fernando, compuestas por arcillas y arcillas arenosas con gravas y fragmentos de bloques.

La **zona 3** presenta velocidades de onda de corte (V_s) y compresionales (V_p) mayores a 600 y 1400, respectivamente, de espesor indeterminado y cuya rigidez aumenta en profundidad. Se asocia a estratos más sanos de roca de la formación San Fernando con RQD variables.

4.2.2. Tomografía eléctrica

El ensayo de Tomografía eléctrica o “Imagen Eléctrica”, se constituye en uno de los métodos de prospección más tradicionales de la geofísica (Arias, 2011). Su principio fundamental se basa en la medición

de corrientes y voltajes generados por una inyección de corriente inicialmente en la superficie y posteriormente al interior del terreno. A partir de un factor geométrico generado por el arreglo o dispositivo empleado, sumado a los valores de corriente y voltaje medidos se puede establecer los valores de resistividad aparente en profundidad y en forma lateral de la línea.

Con las mediciones adquiridas se construye una sección en dos dimensiones (2D) que muestra una primera aproximación de los cambios en el subsuelo. Posteriormente, se aplica un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de resistividades o imagen

eléctrica. Imagen que será un resultado interpretable desde un punto de vista físico y geológico, y que dará información sobre las características físicas del subsuelo.

Se caracteriza por ser una técnica de resistividad multielectrónica, cuyo arreglo geométrico varía dependiendo del objeto de estudio.

En la siguiente imagen se muestra el resultado de una de las tomografías ejecutadas, mostrando las distintas zonas y sus respectivas descripciones.

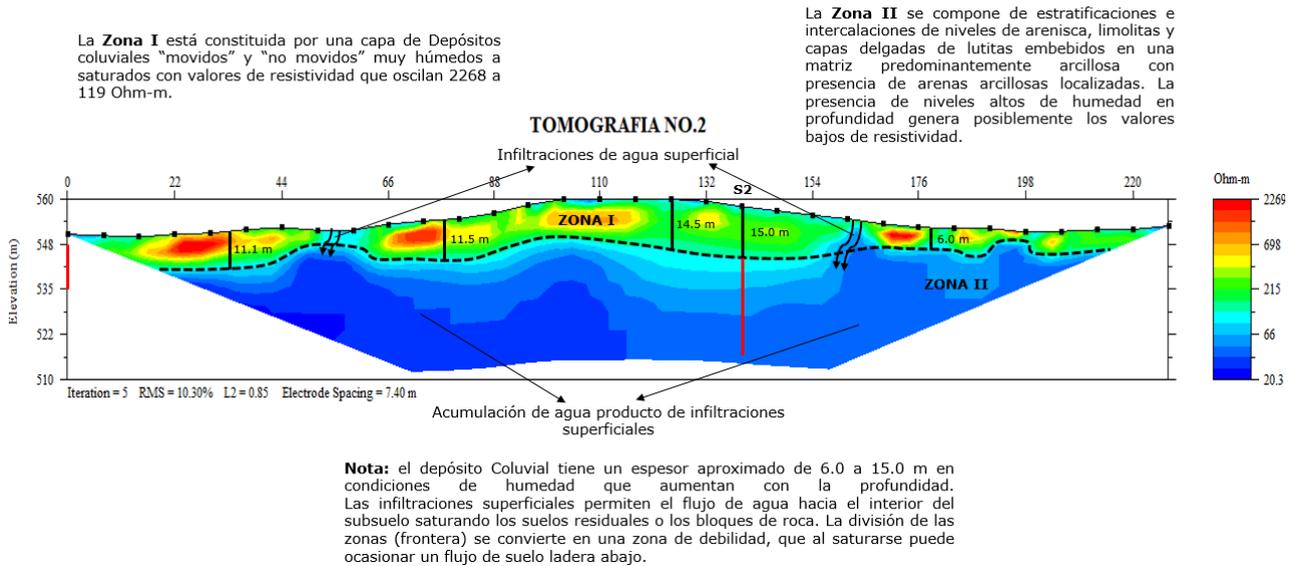


Figure 9. Ejemplo de resultado de tomografía eléctrica.

4.2.3. SEV: Sondeo eléctrico vertical

Los sondeos eléctricos verticales tienen por objetivo específico determinar la distribución aparente de la resistividad eléctrica del subsuelo en un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida obtenidos mediante mediciones realizadas por métodos convencionales de corriente continua; al interpretar los datos de resistividad aparente se obtiene información de las estructuras del subsuelo y de sus características fisicoquímicas, definiendo las condiciones del medio geológico. Los métodos de interpretación se pueden dividir en el cualitativo o empírico y el cuantitativo. El resultado final de este tipo de estudio es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos.

Los valores de la resistividad en el suelo están determinados fundamentalmente por la porosidad y por la salinidad del agua que contienen, más que por su composición mineralógica. La resistividad eléctrica de los materiales varía desde 10-8 Ohm-m en los metales nativos hasta 1015 Ohm-m en micas (perpendiculares de formación), lo cual implica un gran rango de valores que caracterizan los materiales. Es importante indicar que en materiales detríticos la resistividad aumenta con el tamaño de grano, los factores mencionados hacen que la

resistividad de cada tipo de suelo presente gran variabilidad.

En la siguiente tabla se muestra un breve resumen de la descripción de los materiales asociados a los datos obtenidos en uno de los SEVs.

Table 2. Resumen sondeo eléctrico vertical.

Prof. (m)	Und Geo	Resist (Ohm -m)	Descripción
0 – 0.64	Q2v movido	178	Depósito coluvial no consolidado con presencia de bloques de gran tamaño (areniscas) y de característica seca.
0.64–1.59	Q2v movido	1358	Depósito coluvial no consolidado con mayor presencia de suelos finos (arcillas).
1.59-3.94	Q2v movido	273	Depósito coluvial no consolidado compuesto por arcillas y bloques de areniscas medianamente húmedos.
3.94-15.23	Q2v	119	Depósito coluvial inactivo "dormido" compuesto por arcillas y bloques de areniscas medianamente húmedos.

15.23-25.97	E2E3sf	74	Suelos residuales de la formación San Fernando, conformado por arcillolitas grises y Lutitas de color gris oscuro muy fracturadas y ligeramente húmedas.
25.97-53.51	E2E3sf	33	Arcillolitas de color gris oscuro, consolidadas, muy fracturadas y deformadas, con índice de meteorización y consistencia medios.
53.51-79.89	E2E3sf	139	Lutitas de color gris oscuro, laminada con presencia de capas de carbón, de bajo fracturamiento.
79.89-165.0	E2E3sf	1874	Lutitas con presencia de capas o lentes delgadas de areniscas, de alta rigidez.

- Clasificación (límites, granulometría, humedad).
- Peso unitario.
- Gravedad específica.
- Corte directo.
- Peso unitario
- Triaxial estático.
- Compresión confinada en suelo.
- Compresión simple en roca.
- Carga puntual.
- Tilt test o inclinación en roca.

En función de la gran cantidad de información o “big data” que con la que se contó; se tuvo una perspectiva completa del terreno, de la estratigrafía y de sus propiedades ingenieriles.

5. Insumos para el diseño

Una vez organizada la información se procedió a generar columnas gráficas teniendo en cuenta distintos valores esenciales para la alimentación y calibración de la estratigrafía y de los parámetros para los modelos que se planeaban realizar. Tal como se observa en la Figura 10.

4.3. Resultados exploración geotécnica

Además de la información cruda de sondeos con resultados de número de golpes, descripción, RQD y de líneas sísmicas, tomografías y sondeos eléctricos verticales en función de velocidades de onda y resistividades, se ejecutaron distintos ensayos de laboratorio a las muestras extraídas:

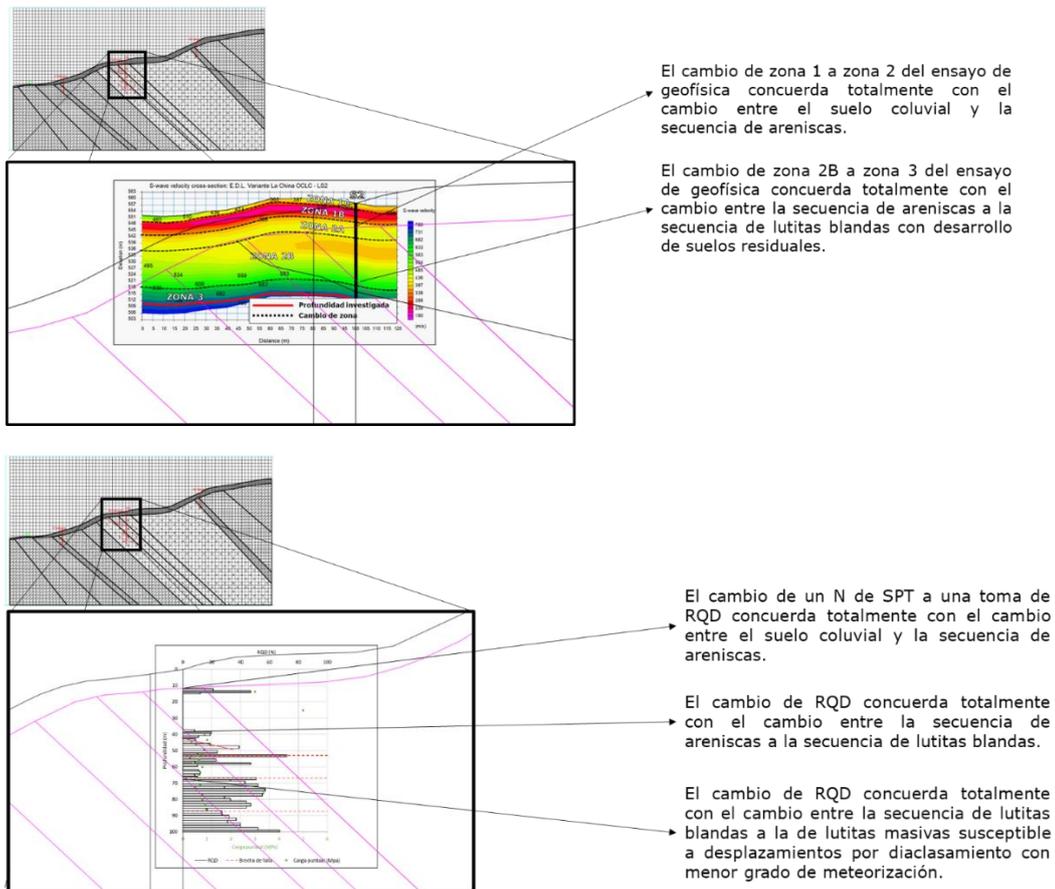


Figure 10. Vinculación de información geotécnica para verificación de estratigrafía y parámetros en perfiles para los modelos.

Otro insumo primordial que se tuvo en cuenta fue la inclusión de discontinuidades en los estratos rocosos que

fueron caracterizadas en la geología a partir de las perforaciones, visitas de campo, información secundaria y descripción de las muestras.

6. Modelación numérica con elementos finitos

Para la modelación correcta de las superficies de falla globales del terreno y un estimativo correcto de los puntos de plastificación producto de la ejecución de la excavación del PHD, se opta por el uso del modelo constitutivo Hoek Brown para rocas meteorizadas, su ventaja más grande frente a otros modelos es que un único juego de parámetros de calibración del macizo reproduce correctamente la tensión resistente en 4 puntos sea en talud o en excavación sin tener que modificar los parámetros de resistencia, esto nos permite analizar correctamente fallas probables de deslizamiento o de convergencia de la excavación. Este modelo adopta una superficie de fluencia de Mohr-Coulomb con generatriz curva.

6.1. Procedimiento de calibración

- σ_{ci} (Resistencia a la compresión simple): Para la resistencia a la compresión simple se utilizó los datos tomados de los ensayos de carga puntual (PLI) y se correlacionaron con la resistencia a la compresión simple del macizo en condición intacta (UCS), cabe resaltar que se tomó como referencia dos correlaciones una para las lutitas (shales) y otra para las areniscas (sandstone).

Ventajas: Cuando se toman muestras intactas en campo estas generalmente heredan y presentan fracturas internas por lo que no se puede determinar si de verdad fallo en una condición sin un grado de meteorización, sin embargo, las correlaciones con el índice de carga puntual obvian estos efectos.

- m_i (Constante de fuerza del material): Este parámetro fue calibrado para cada tipo de roca y se adoptó como una propiedad intrínseca del material el límite inferior con respecto a los valores reportados por Hoek para efectos de analizar máxima falla probable.

- GSI (Geological Strength Index): Debido a la imposibilidad de ingresar y detallar en profundidad la roca únicamente solo con perforaciones generando así la imposibilidad de dar un valor a el parámetro GSI ya que depende en su mayoría por un criterio cualitativo de su grado de meteorización, se opta por correlacionar el RQD (Rock Quality Designation) con el grado de meteorización del material planteada por Truzman en el 2009.

Ventajas: Se pueden observar muestras de las rocas y asignarles su grado de meteorización en profundidad caracterizando así mayores estratos que los que afloran en superficie

Se puede utilizar la geología estructural correlacionada con las líneas geofísicas y los ensayos de RQD para determinar zonas homogéneas y encontrar congruencia entre las mediciones.

6.2. Importancia de la geofísica para la alimentación de los modelos

Un dato fundamental que permitió alimentar los parámetros para los modelos y que fue tomado de los resultados de ensayos geofísicos fue la velocidad de onda de corte (v_s), como se puede observar en la Figura 11. definido para cada cambio de material junto con las distintas propiedades seleccionadas de acuerdo con la totalidad de la caracterización y las discontinuidades encontradas en los estratos rocosos.

Litología	Nombre modelo	RQD	PLI (MPa)	GSI	USC (MPa)	m_i	V_s (m/s) y (kN/m ³)	Go (MPa)	ν	E_o (MPa)	
Secuencia de areniscas de grano fino a muy fino, localmente meteorizadas. Suelos areno-arcillosos y arcillas arenosas, hacia la base areniscas de grano fino.	Arenisca RQD=13	13	5	14	90	13	420	25	450	0	1080
Secuencia de areniscas de grano fino a muy fino, localmente meteorizadas. Suelos areno-arcillosos y arcillas arenosas, hacia la base areniscas de grano fino. (Altamente meteorizada)	Arenisca RQD=0	0	3	10	54	13	340	25	295	0	708
Intercalaciones de Lutitas blandas con desarrollo de suelos residuales, con niveles de areniscas de grano fino, localmente conglomeráticas. Hacia la base lutitas blandas meteorizadas	Lutita RQD=7	7	0.65	12	8.19	4	500	25	637	0	1529
Intercalaciones de Lutitas blandas con desarrollo de suelos residuales, con niveles de areniscas de grano fino, localmente conglomeráticas. Hacia la base lutitas blandas meteorizadas (Altamente meteorizadas)	Lutita RQD=0	0	0.65	10	8.19	4	640	25	1044	0	2506
Secuencia de lutitas masiva, blandas, algo fracturadas y levemente meteorizadas susceptibles a desplazamientos por diaclasamiento. Formación San Fernando. E2E3sf	Lutita RQD=10	10	0.65	13	8.19	4	650	25	1077	0	2585
Secuencia de lutitas masiva, blandas, algo fracturadas y levemente meteorizadas susceptibles a desplazamientos por diaclasamiento. Formación San Fernando. E2E3sf	Lutita RQD=40	40	0.65	25	8.19	4	650	25	1077	0	2585
Intercalaciones de areniscas de grano fino a muy fino, cuarzosas. Hacia la base lutitas meteorizadas	Arenisca RQD=20	20	5	16	90	13	450	25	516	0	1238
Lutitas fracturadas fisiles	Lutita RQD=0 fisiles	0	0.65	10	8.19	4	640	25	1044	0	2506

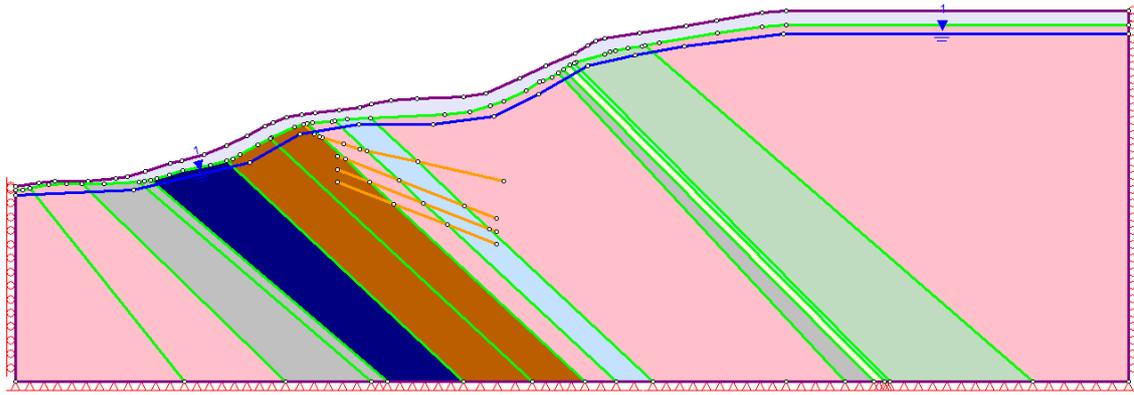


Figure 11. Parámetros para el modelo y estratificación adoptada.

6.3. Perfiles de análisis

Toda la información planteada anteriormente genera una validación cruzada de toda la información disponible lo cual permite validar el perfil propuesto y comprueba la importancia de la exploración geotécnica, geofísica y geológica ejecutada en el proyecto. Uno de los perfiles analizados se puede observar en la Figura 11.

De acuerdo con lo observado en la caracterización, se obtiene que las zonas de lutitas masivas y fracturadas por diaclasamiento con RQD mayores al 40 y las intercalaciones de areniscas de grano fino con RQD mayores al 20 son materiales aptos en términos de capacidad para la realización del PHD, ya que presentan grados de meteorización menores frente a los otros perfiles, estas rocas se encuentran en la parte media de la ladera debajo de la perforación TT-02 posterior a los 67 metros de profundidad, sin embargo, las lutitas que logran un RQD mayor al 10 que se encuentran posterior a los 40 metros presentan valores intermedios, lo que quedaría para análisis de viabilidad para la realización del PHD en dicha zona, las otras zonas si presentan valores bajos de resistencia lo que imposibilitaría la realización del PHD.

6.4. Resultados modelo de estabilidad

En función de los parámetros geotécnicos y la litología planteada anteriormente, se realiza un análisis de estabilidad a partir de la metodología SRM (Strength reduction method) el cual permite calcular factores de seguridad reduciendo parámetros resistentes, Con el modelo se obtuvo una superficie de falla máxima probable con una profundidad referente a la perforación de 45 metros de profundidad, esto indica que todo PHD realizado por debajo de esta profundidad de falla probable no se vería afectado por una falla global del talud, lo cual da un punto de partida en profundidad para plantear la profundidad de diseño del PHD.

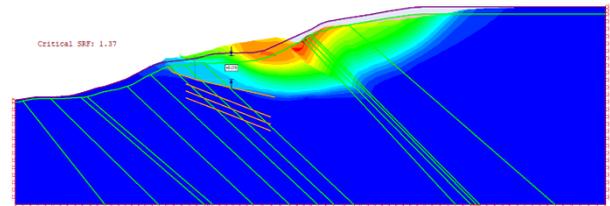


Figure 12. Resultado modelo de estabilidad elementos finitos.

6.4.1. Conclusiones modelo de estabilidad

- La falla global del talud corresponde a una profundidad de 45 m, es decir, ningún PHD colocado por debajo de esta profundidad se vería afectado por una falla global del talud.
- Aunque el F.S sea mayor a 1.0, es decir la condición del talud actual es estable, esta superficie de falla podría ser desarrollada en el tiempo por ablandamiento de la roca con falla progresiva en el tiempo, la cual será dominada por las condiciones residuales de la roca, sin embargo, si el PHD se realiza con una profundidad mayor que esta superficie de falla, la superficie de corte no generaría ningún efecto sobre el PHD.
- Cabe señalar un aspecto muy importante, si se analizara únicamente los mecanismos de deslizamiento del coluvial se darían fallas superficiales con actual F.S menor a 1, por lo que se esperan deslizamientos recurrentes en esta zona, este aspecto valida la necesidad de la realización de un PHD profundo para no tener que estabilizar la zona de los coluviales.

6.5. Resultados modelo de convergencia esfuerzo-deformación 2D

Se realizó a una sección para determinar posibles fallas en la realización de la excavación de la prueba piloto del PHD, se realizaron distintos modelos para verificar la estabilidad y desplazamientos en la excavación en diferentes puntos del alineamiento.

A través de la modelación del PHD se obtiene que, si se realiza una excavación de 18 pulgadas para el sector de las lutitas, probablemente se tendría una convergencia del 1.2% de la excavación, es decir, una relación entre el desplazamiento radial frente al radio de la excavación (U_r/R), el cual es un valor alto lo que induciría a fallas en

el terreno y desprendimiento de bloques, a continuación, se muestran los resultados.

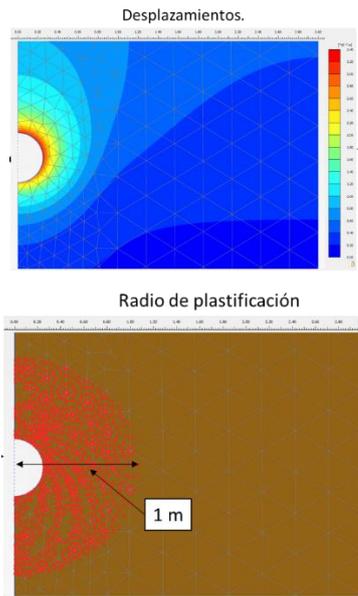


Figure 13. Resultados modelo de convergencia esfuerzo-deformación 2D.

6.5.1. Conclusiones modelo esfuerzo-deformación

Se puede concluir por esta sección que el tramo el PHD construido en estas lutitas, tendrá problemas de desprendimientos por efectos de plastificación del macizo rocoso, así mismo, posterior a realizar la excavación piloto probablemente esta excavación pasará de tener 18 in a 15 in.

El comportamiento del PHD se puede asemejar a un túnel donde se va a tener una convergencia en función del radio y se va a generar un radio plástico sin embargo la problemática de esto es que este tipo de excavación no tiene elementos de sostenimiento, por lo tanto, se deja que la roca plastifique en su totalidad.

Los resultados mostrados implican que se requiera o se recomiende colocar un sostenimiento en la perforación que evite que esta se cierre, lo cual tendrá que ser tenido en cuenta en los diseños finales y por el constructor.

6.6. Resultados modelo de convergencia esfuerzo-deformación 3D

Para este modelo se determinó un corte en el que se realiza la transición entre lutita meteorizadas con las areniscas del perfil para evaluar que ocurre en el cambio de sección.

Como se puede observar en el mapeo de desplazamientos mostrado en la Figura 14, existe convergencia significativa en la zona donde se encuentra la lutita, esto comprueba lo presentado en el modelo 2D que esta zona sí se vería susceptible a presentar o convergencia de la excavación (flujo de material al interior) o caída de bloques producto de la meteorización de la roca y así se valida la reducción de diámetro de excavación. Así mismo es importante señalar que a

medida que se perfora en el estrato de lutita existirá una zona de transición (Longitud aproximada de 60 m) donde la roca convergerá menos por efectos del cambio de material de arenisca a lutita, adicionalmente es importante a tener en cuenta que las areniscas por su alta permeabilidad tendrá infiltraciones de agua en la excavación.

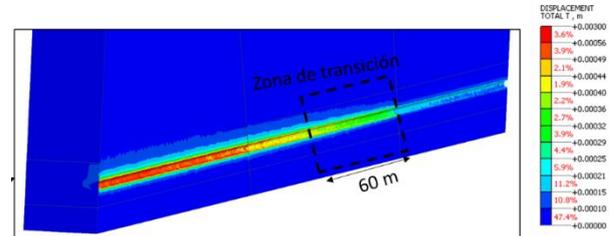


Figure 14. Resultados modelo de convergencia esfuerzo-deformación 3D.

7. Discusión viabilidad PHD

7.1. Geología

Los espejos de falla mostrados en la Figura 5 no representan un riesgo para el PHD, ya que varias estructuras importantes en el mundo han sido construidas bajo estas condiciones y han tenido un gran comportamiento durante décadas. El confinamiento a la profundidad del PHD ejerce un control geológico.

El tensor de esfuerzos obtenido para el área confirma el régimen compresivo que genera los pliegues y fallas inversas, e incluso el componente de rumbo sinistral de la Falla Loma de San José. Este campo de esfuerzos ha sido previamente identificado en la zona circunvecina a partir de mecanismos focales de sismos y con datos de campo en planos estriados de falla. El tensor se considera un vector con dirección y magnitud, el cual se puede descomponer en planos estructurales de interés con un vector o esfuerzo normal y otro tangencial o de cizalla. Es de aclarar que el campo de esfuerzos actúa de forma permanente haciendo que en algunas estructuras se acumule energía según se oriente en forma perpendicular al tensor y que a lo largo de otras se libere en movimientos si se dispone a un ángulo de 30° con respecto al tensor (cizalla según Ley de Anderson), tal como lo confirman las fallas menores que se encuentran en el área con orientaciones subparalelas a las familias de diaclasas conjugadas o de cizalla. Bajo este tensor, las estructuras con rumbo NE se desplazan como fallas dextrales, mientras las estructuras con rumbo NW se mueven en forma sinistral. Se asume que la estructura es más segura en la medida que se aleje del ángulo crítico respecto del tensor. Para el caso del PHD la orientación respecto al tensor varía entre 50° y 60°, lo cual lo hace una condición de riesgo bajo según la Ley de Anderson.

7.2. Modelos de elementos finitos

Evidenciando los resultados de los modelos analizados, en donde se observan algunos posibles efectos adversos que deben ser mitigados y tenidos en cuenta tanto en los diseños definitivos, como en la

elección del tipo de proceso de perforación, y de los equipos.

A esto se suman dos criterios que fueron indispensables a la hora de seleccionar la longitud y profundidad del trazado proyectado para el PHD.

7.3. Áreas de perforación y de lingada

En la búsqueda de atravesar la zona problemática de los deslizamientos se hace necesario cruzar la quebrada mediante el PHD, lo que implica una longitud de aproximadamente 2000 metros de perforación subterránea.

Esa longitud contempla dos zonas seguras y suficientemente amplias para ser utilizadas como áreas de trabajo para la operación de la perforación horizontal dirigida tanto en la salida como en la llegada, para la perforación y la lingada.

7.4. Topografía variable

El segundo criterio que permite viabilizar el trazado del PHD en las condiciones de longitud y profundidad en las que está propuesto es que al estar ubicado en una zona de topografía ondulada pero con una gran variabilidad de pendientes y alturas, el cruce con la quebrada La China es un punto bajo, razón por la cual el perfil de la perforación se profundiza hasta aproximadamente 40 metros por debajo del lecho de la quebrada, de esta manera se evitan encontrar estratos aluviales en medio de la perforación y prevenir de manera suficiente posibles efectos por socavación.

8. Conclusiones

Se logró la integración de la “big data” compuesta por todos los estudios realizados por diferentes firmas entre los años 2021 a 2023 con enfoque en la precisión de perfiles geológicos geotécnicos y en la definición de parámetros para los modelos de elementos finitos.

Una campaña de exploración únicamente compuesta por perforaciones puntuales se queda corta para una idónea caracterización de los suelos y estratos rocosos para un área y profundidad tan significativo como se requieren para el diseño y construcción de un PHD en estas condiciones tan complejas. Los ensayos geofísicos fueron imprescindibles para entender y validar la continuidad o variabilidad en las condiciones de los estratos, verificar las condiciones de humedad y correlacionar la consistencia de los materiales donde no se obtuvo número de golpes de SPT. Cabe destacar que estos ensayos geofísicos requieren de perforaciones con recuperación de muestra para comprender y calibrar los hallazgos.

En el caso de estudio expuesto en el presente documento toda la exploración, ensayos y geofísica muestran una correlación total con la geología estructural detallada presentada, lo cual valida el perfil a utilizar en los análisis numéricos de deformación y estabilidad en cada una de las propiedades de las litologías.

En cuanto a la profundidad del PHD planteado, además de la proyección de la remoción en masa que determina como una profundidad mínima aceptable de 45 m, también se tuvieron en cuenta los estudios geofísicos, las muestras de las perforaciones y clasificación del macizo rocoso, proporcionando una información que deriva en que la profundidad más aceptable debería ser mayor a 60 m. No obstante, el determinante final fue la topografía, ya que, con respecto a la cota más alta del alineamiento de la tubería (más de 100m en el punto más alto sobre el deslizamiento), dejaría entre 30 y 40 metros al lecho (talweg o a la vaguada) de la quebrada, lo cual justifica plenamente dicha profundidad prevista.

En cuanto a la longitud del PHD y la ubicación sobre la ladera, se consideraron las limitaciones del resguardo Indígena y la escasa área disponible para la maniobra de construcción, que para poder conformarlas en otro sitio se requerirían grandes volúmenes de excavación los cuales son desfavorables a la estabilidad de las laderas donde se encuentran otras infraestructuras (oleoducto, torres eléctricas y vía nacional). Resultando idóneo el sitio definido actualmente y suficiente para atravesar el deslizamiento y cruzar el cuerpo de agua.

Se realizaron modelaciones de la estabilidad de la perforación bajo las condiciones de calidad de roca identificadas, lo cual arrojó que, si bien existe efecto de arco, se debe esperar que, en algunos de los mantos de roca más fracturados, se presenten desprendimientos de fragmentos de roca, ya que el tamaño de la perforación del PHD es mayor al tamaño de dichas fracciones de roca. Esto deberá ser tenido en cuenta en los diseños finales y por el constructor para poder ejecutar la perforación satisfactoriamente.

Es importante considerar que para este caso los RQD encontrados son bajos, y teniendo en cuenta la clasificación del macizo mediante RMR se considera una roca de mala calidad, lo cual implica que el constructor debe tenerlo muy en cuenta para la planeación de su trabajo de perforación, utilizando la técnica adecuada, así como los equipos apropiados que garanticen la estabilidad de la perforación y la continuidad del trabajo.

9. Referencias

Anderson, E. M. 1951. “The dynamics of faulting and dyke formations.” Oliver and Boyd.

Arias, D. 2011. “Exploración geotécnica – Relaciones geoelectricas.” Universidad Nacional de Colombia.

Consorcio GSG (Geominas - Serviminas - Gemi). 2015. “Mapa geológico de la plancha 122 Chucarima”. Servicio Geológico Colombiano.

Hoek, E., & Brown, E. T. 1919. “The Hoek–Brown failure criterion and GSI. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical”, 445-463.

Jimenez, J. 2006. “Las tres Leyes de la Geotecnia.” <http://jorgejimenezs.blogspot.com>

Jimenez, J. 2006. "Semiología geotécnica."
<http://jorgejimenezs.blogspot.com>

Redpath, B. B. 1973. "Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations". Technical Report E-73-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksbury, MS.

Truzman, M. 2009. Metamorphic Rock Mass Characterization Using the Geological Strength Index (GSI). 43rd U.S. Rock Mechanics Symposium & 4th U.S. - Canada Rock Mechanics Symposium.