



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ALTERNATIVAS PARA ECONOMIZAR Y
OPTIMIZAR LA ESTABILIDAD DE UN TALUD**

Autor
Alejandro Obando Ibarra

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental
Medellín, Colombia
2019



Alternativas para economizar y optimizar la estabilidad de un talud

Alejandro Obando Ibarra

Informe de práctica
Como requisito para optar al título de:
Ingeniero civil

Asesora

Yenni Mariana Ramírez. Ingeniera civil.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental.
Medellín, Colombia
2019.

	1
Resumen	2
Introducción	4
Objetivos	8
<i>Objetivo general</i>	8
<i>Objetivos específicos</i>	8
Marco teórico	9
<i>Geología y Geomorfología</i>	10
<i>Topografía</i>	11
<i>Exploración de campo</i>	12
<i>Sistema de estabilización</i>	13
Problemática	13
Los anclajes	14
Cortes y terracedo	17
Sistema de mallas flexibles	17
Resultados y análisis	25
<i>Topografía y geología</i>	25
<i>Amenazas identificadas en la zona</i>	28
<i>Cálculos y análisis de inclinaciones</i>	29
<i>Normativas</i>	31
<i>Observaciones geotécnicas</i>	35
<i>Información obtenida, exploraciones de campo y ensayos de laboratorio</i>	38
<i>Cálculo de la estabilidad</i>	44
<i>Diagnóstico preliminar</i>	47
Propuestas alternativas para la estabilización de taludes	49
Cortes y terracedo	53
Sistema de mallas flexibles	56
Conclusiones	71
Referencias Bibliográficas	74
Anexos	75

Resumen

El mejoramiento de una carretera genera la necesidad de incrementar inversiones en zonas determinadas, con el interés de afianzar el desarrollo de la nación. Año tras año, el corredor conocido como la ruta 60 de la red vial nacional o transversal Quibdó – Medellín, fue intervenido de diferentes maneras para obtener un trazado eficaz, con un diseño amplio y que permitiera la movilización adecuada de cualquier tipo de vehículo. Sin embargo, el intento por lograr el compromiso establecido encontró un revés cuando los malos manejos constructivos y financieros hicieron mella a lo largo de los plazos establecidos. Con urgencia, se determinó retomar labores sobre un sitio específico que inicia desde el corregimiento El Siete, Municipio Carmen de Atrato, hasta aproximadamente 10 kilómetros adelante hacia Quibdó, departamento del Chocó, aferentes a dos torres de energía de gran importancia para la localidad.

Para dar inicio a un plan de mejoramiento adecuado, se contrató a la empresa EVALTEC S.A, para llevar a cabo los estudios pertinentes que ayuden a rectificar los trazados anteriores y de la misma manera pueda lograrse junto con el constructor, la óptima definición del corredor. Para tal fin, se propuso una estabilización mediante 739 anclajes en el sector de intervención. No obstante, fue necesario reevaluar dichos diseños por diferencias entre la interventoría encargada y los diseñadores geotécnicos, dando como resultado la necesidad de buscar nuevas alternativas de estabilización que cumplan los requisitos pertinentes y que financieramente sean viables.

Inicialmente, para seleccionar las alternativas necesarias se hizo una revisión de la topografía junto con la geología regional; esto con el fin de establecer una perspectiva general del proyecto.

Posteriormente, se estimaron los cálculos de las pendientes para identificar los sitios críticos. Con el fin de corroborar la información secundaria, se llevaron a cabo visitas de campo que dieron lugar a la exposición de un diagnóstico preliminar de la zona de amenaza.

Luego de realizar los cálculos representativos de estabilidad, se concluyó que en las zonas de contacto directo con las torres de energía no es posible cambiar el método inicialmente proyectado. Sin embargo, se encontró que en las zonas aledañas a dichas torres si era factible generar nuevas opciones y por esto se plantearon diferentes alternativas de estabilización como combinar el sistema de anclajes con el concreto lanzado e implementar mallas flexibles, hacer terracedos que logren cumplir con los factores de seguridad adecuados. Una vez establecidas las alternativas que optimizaban el funcionamiento de los taludes, se presentó el ahorro económico dejando de utilizar aproximadamente 362 unidades de anclajes, preservando la seguridad del corredor y promoviendo la revegetalización y el cuidado ambiental.

Introducción

En Colombia, la infraestructura vial es un elemento que aún se encuentra en desarrollo y considerar el concepto de vías 4G, es algo reciente en los conceptos de un colombiano. Es claro que las necesidades de una sociedad en constante evolución la llevan a buscar nuevas fuentes de subsistencia, siendo indispensable desplazarse de un lugar a otro con relativa facilidad. Para el caso colombiano, la región del Pacífico ha sido parte importante en dicha evolución en razón de que se ha caracterizado por ser una región con una inmensa riqueza ecológica, hidrográfica, minera y forestal, donde incluso se encuentran parques nacionales naturales. Es además considerada una de las regiones de mayor biodiversidad y pluviosidad del planeta con precipitaciones del orden de los 4 000 mm/anuales según el Ministerio de Minas y Energía de Colombia (INGEOMINAS, 2005).

Gran parte de los problemas en los corredores viales hacia esta zona son solucionados año tras año gracias a entidades gubernamentales que impulsan las intervenciones para los mejoramientos correspondientes; sin embargo, luego de dar inicio a las actividades, el manejo económico y los requerimientos constructivos llevan a dar por terminado de manera prematura todos los procesos, quedando de manera inconclusa las diferentes órdenes de trabajo.

Evaluaciones Técnicas S.A., EVALTEC, es una empresa de ingeniería especializada en asesoría, diseños y control de calidad que se constituyó en el año de 1994 en la ciudad de Medellín y desde entonces ha ofrecido sus servicios en todas las zonas de Colombia logrando un alto grado de experiencia y crecimiento en áreas como pavimentos, geotecnia y concretos.

EVALTEC S.A ha sido contratada para llevar a cabo los trabajos de consultoría y asesoría del corredor vial Quibdó – Medellín que se identifica como la ruta 60, tramo 6002 de la red vial nacional y que se ha ido ajustando, a través de los diferentes contratos, desde el trabajo de Metrocorredores 8 en 2009, hasta llegar a un diseño capaz de suplir las necesidades de la zona en el año 2015, con anchos de calzada, sobreanchos, elementos de seguridad adecuados, estructuras de pavimentos para 20 años, taludes seguros y puentes suficientes.

La finalidad de garantizar un buen funcionamiento del corredor surge de la importancia de esta red vial en el país, por ser la comunicación entre la región del Pacífico y Medellín. Además, el transporte de fuentes alimenticias, servicios de mensajería y el paso de carga pesada; proporcionan un crecimiento exponencial para la región garantizando el desarrollo y la economía de una gran cantidad de colombianos. No obstante, debido a numerosos cambios en el manejo del corredor, es importante resaltar que se debe seguir los lineamientos estipulados en contratos anteriores sin dejar de lado la evolución de las especificaciones de carreteras y normas requeridas para desarrollo de las actividades propuestas; generando a partir de dichas normativas, diseños seguros que garanticen el correcto funcionamiento de la misma.

De acuerdo con lo anterior, es necesario que ciertos sectores, como el que se inicia desde el corregimiento El Siete, Municipio Carmen de Atrato, hasta aproximadamente unos 10 kilómetros adelante hacia Quibdó, departamento del Chocó (donde se analiza la estabilización de los taludes aferentes a dos torres de energía de la Empresa Distribuidora del Pacífico S.A E.S.P (DISPAC) en proximidad de las abscisas K78+450 y del K78+645), sean intervenidos de manera rápida para subsanar el deterioro de los trabajos precedentes y la aparición de nuevas dificultades referidas a inestabilidades en los taludes que se han cortado (Figura 1), resaltando

que es notorio el desprendimiento de material por falta de tratamiento en zonas altamente fracturadas y en la corona del talud, en donde el suelo es más propenso a desestabilizarse. En el año 2015, el Consorcio Corredores LAX 051 fue el responsable de los estudios y diseños de los taludes en el área de estudio, pero sólo se estipularon trabajos hasta de 25 m de altura de manera vertical respecto a los cortes y no contiene ninguna condición especial para proteger los sectores de la parte alta, es por esto que se requieren nuevos estudios para lograr la estabilización.



Figura 1. Zona de intervención crítica afereente a las torres de energía (EVALTEC S.A, 2019).

Los análisis geotécnicos recientemente realizados en el sector que se muestra en la figura 2, han llevado a reproducir una solución por medio de anclajes activos de 30 a 33 m de longitud en varios niveles a lo largo del sector de las torres de energía. No obstante, se pretende buscar alternativas que garanticen no solo la seguridad del tránsito diario, sino también, la optimización de los materiales y ajustar un presupuesto que permita a la consultoría reducir los gastos de la obra. Por lo tanto, se realizará una investigación sobre otras formas de estabilización eficaces y que concuerden con un gasto moderado, ya que la cantidad de anclajes causa un déficit en el presupuesto general del proyecto.

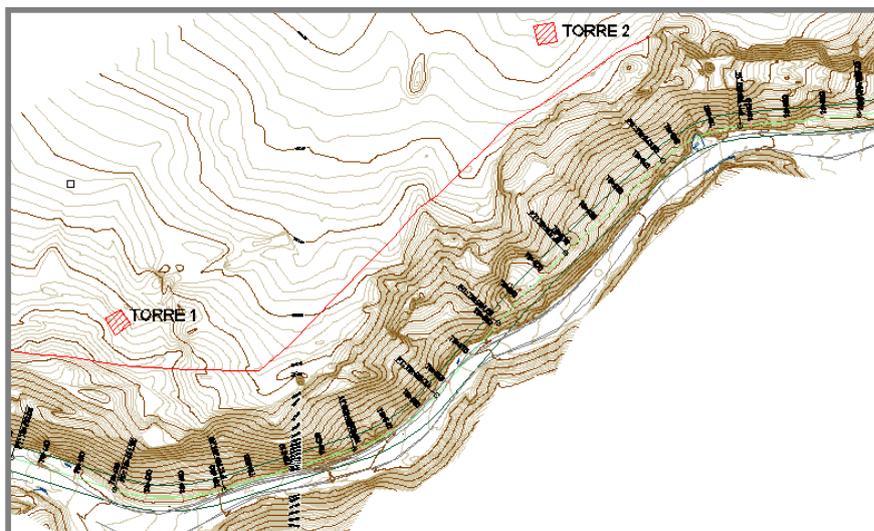


Figura 2. Topografía Sector K78+392 a K78+750 (EVALTEC S.A, 2019).

Con el desarrollo de este trabajo, se busca aportar a la construcción de la solución a un problema ingenieril e impactar el desarrollo del país por medio de las contribuciones al proyecto de consultoría y asesoría del corredor vial Quibdó – Medellín. Además de esto, dar una muestra de la situación actual de un corredor importante en el desarrollo del país, y aportar hacia la mejor utilización de los recursos de la población.

Objetivos

Objetivo general

Proponer alternativas de solución para disminuir el costo de estabilización de taludes en el tramo K78+392 a K78+750 de la vía Transversal Quibdó-Medellín.

Objetivos específicos

- ❖ Determinar las amenazas en el tramo del corredor seleccionado y sus respectivas localizaciones.
- ❖ Determinar la normativa aplicable a la estabilización de taludes según las condiciones particulares del proyecto.
- ❖ Determinar las zonas que requieran tratamiento geotécnico de acuerdo a su vulnerabilidad a la pérdida de estabilidad.
- ❖ Proponer la implementación de obras de mitigación que solventen los problemas geotécnicos identificados.
- ❖ Plantear las diferentes alternativas de estabilización para disminuir costos y sus diferentes características.

Marco teórico

En el proceso de mejoramiento del tránsito por la vía Quibdó-Medellín, en aras de reducir los costos del transporte de carga y pasajeros, y optimizar la conexión entre la región antioqueña, la costa Caribe y la costa Pacífica, el Instituto Nacional de Vías INVIAS, desarrolla trabajos de mejoramiento y pavimentación del tramo localizado sobre la parte central de la cordillera Occidental (Figura 3), entre la vereda La Mansa y el Alto de la Sirena y la parte del flanco occidental pasando por el sitio Bocas del Habita (El Siete) hacia Quibdó (INVIAS, 1998).



Figura 3. Localización satelital del corredor en estudio (Google Maps, 2019).

En esta zona, los taludes presentan susceptibilidad a ser erosionados por tener una matriz disgregable, y que pueden extenderse, ya sea por la generación de una superficie de inestabilidad, posibilidad de infiltración o mayor exposición del talud a otro fenómeno que lo afecte y desestabilice (EVALTEC S.A, 2019).

La degradación del suelo por erosión, se refiere en particular a la pérdida de material superficial a lo largo de la corteza terrestre y puede ser ocasionado por diferentes factores tales como el

agua y/o el viento que en gran medida depende del comportamiento del ser humano y esto a su vez trae consecuencias sociales, económicas y culturales (IDEAM-UDCA, 2015).

Sin embargo, para controlar la erosión o evitarla existen condiciones que deben cumplirse, sea en el tratamiento de los agentes externos, de los agentes internos o de intervención que garanticen el bienestar de la sociedad.

Geología y Geomorfología

La geología es parte importante del estudio preliminar de un proyecto dado que estudia la composición y la estructura interna y superficial del planeta Tierra, además de los procesos evolutivos que ha sufrido a lo largo del tiempo geológico (Piera, 1876). En general, a nivel regional la cordillera está constituida por rocas sedimentarias de origen marino y por rocas ígneas extrusivas de carácter básico formadas en dorsales oceánicas.

Dentro de los estudios y diseños geotécnicos es indispensable haber determinado claramente la estratigrafía a nivel regional y local, puesto que con ella es posible la interpretación de las rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas presentes en el sitio (Weller, 1960), además debe tenerse en cuenta las formas de la superficie terrestre, enfocándose en describir, entender su génesis y su actual comportamiento, lo que conoce como geomorfología. Para el caso del proyecto en cuestión, la figura 4 ilustra la geomorfología del sitio.

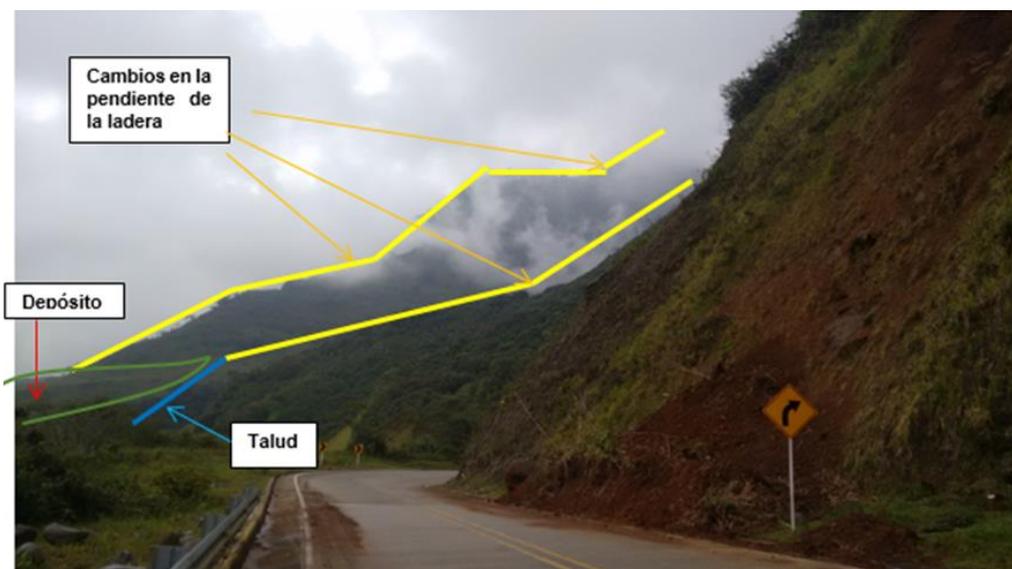


Figura 4. Geomorfología del sector 3 K78+830 al K78+158 (EVALTEC S.A, 2019).

Topografía

La topografía siendo la ciencia que se encarga de representar de manera gráfica las formas y los detalles de una superficie, sea plana o discontinua, es de gran relevancia en este proyecto porque gracias a ella el observador logra ubicar los sitios de amenaza, el nivel de sus pendientes y prever situaciones críticas que puedan ocurrir en un futuro.

Durante muchos años, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, se identificó como la entidad encargada de producir el mapa oficial y la cartografía básica de Colombia; es claro que a nivel Nacional es una herramienta de gran relevancia para ubicar los diferentes sitios de interés para cualquier proyecto, además de adelantar grandes investigaciones geográficas para el desarrollo en este aspecto (IGAC, 2019).

Exploración de campo

Con las exploraciones de campo se busca obtener información amplia de las laderas y la vía actual para plantear las modificaciones necesarias y corroborar la información secundaria obtenida por parte del INVIAS. El sondeo o perforación es la actividad preliminar para comenzar con la exploración, recogiendo muestras representativas cada cierto metraje e identificando la presencia de nivel freático del lugar. Los procedimientos de laboratorio se llevan a cabo como se especifica en el manual de normas de ensayos de materiales para carretera del INVIAS. Con estos, es posible determinar la resistencia de los materiales en estudio y sus diferentes parámetros para lograr analizar la estabilidad.

Sobre la ladera se realizaron perforaciones con el fin de definir los materiales que conforman el talud, en los cuales se efectuaron ensayos alternados de penetración estándar SPT y muestreo con tubo de pared delgada (cuchara partida) según norma INV E-111 “Ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido” (INVIAS, 2013). Para ello se utilizó una pesa de 140 lb y caída libre de 30” sobre golpeador en la cabeza de tubería de diámetro AW, con lazada simple de cuerda de manila de 1”m. Para los puntos en los cuales se identificó punto de rechazo por detectar un suelo más denso, se continuó el sondeo en profundidad por medio de muestreo con barrenas de diámetro NWL o NQ con brocas diamantadas, utilizando la maquinaria mostrada en la figura 5.



Figura 5. Máquina de perforación X-Y-1-2 (Fuente propia).

Sistema de estabilización

Problemática

La implantación de los anclajes en la ladera es necesaria debido a la presencia de las torres de energía localizadas en el sector como se puede ver en la figura 6 y es allí donde no es posible cortar los predios y hacer terrazados, ya que al revisar la ubicación de las torres respecto al pie del talud del corte vial, trazando un talud imaginario de 45 grados, se encontró que las torres no guardan un aislamiento mínimo respecto a la proyección (NSR-10 H.4.2.1 (d) Influencia de taludes próximos a los cimientos), por lo cual se requiere reforzar el talud (NSR, 2010).

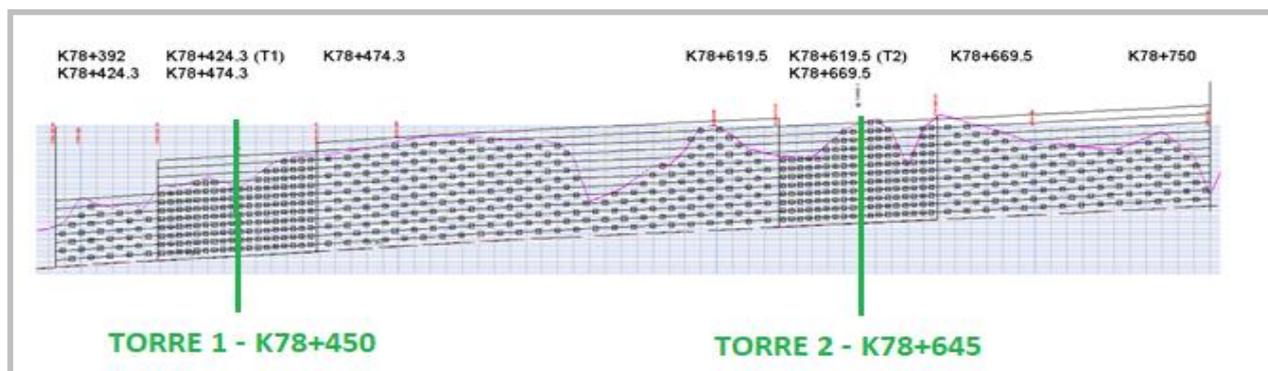


Figura 6. Perfil del sistema de refuerzo de los taludes del Sector del K78+392 a K78+750 (EVALTEC S.A, 2019).

Sin embargo, es posible que las zonas aledañas a ellas se puedan hacer los trabajos de estabilidad básicos como lo son cortes al medio y los cortes a 3/4; lo cual estaría atado a la obtención de predios por parte del contratista siempre y cuando se cumplan con los requerimientos mínimos. Además, dichos trabajos se pueden complementar, combinar o evaluar de forma independiente con otros sistemas de estabilización como lo son: el concreto lanzado, los terracedos, los sistemas de mallas flexibles acompañado de un manto permanente para la retención de finos, entre otros. A continuación, se hace una descripción de la alternativa original conocida como sistema de anclajes.

Los anclajes

La solución implementada por los especialistas argumenta la necesidad de utilizar anclajes distribuidos de la manera correcta a tres bolillos. Un anclaje, como es mostrado en la figura 7, es un elemento capaz de transmitir esfuerzos de tracción desde la superficie del terreno hasta una zona interior del mismo (Yepes, 2016).

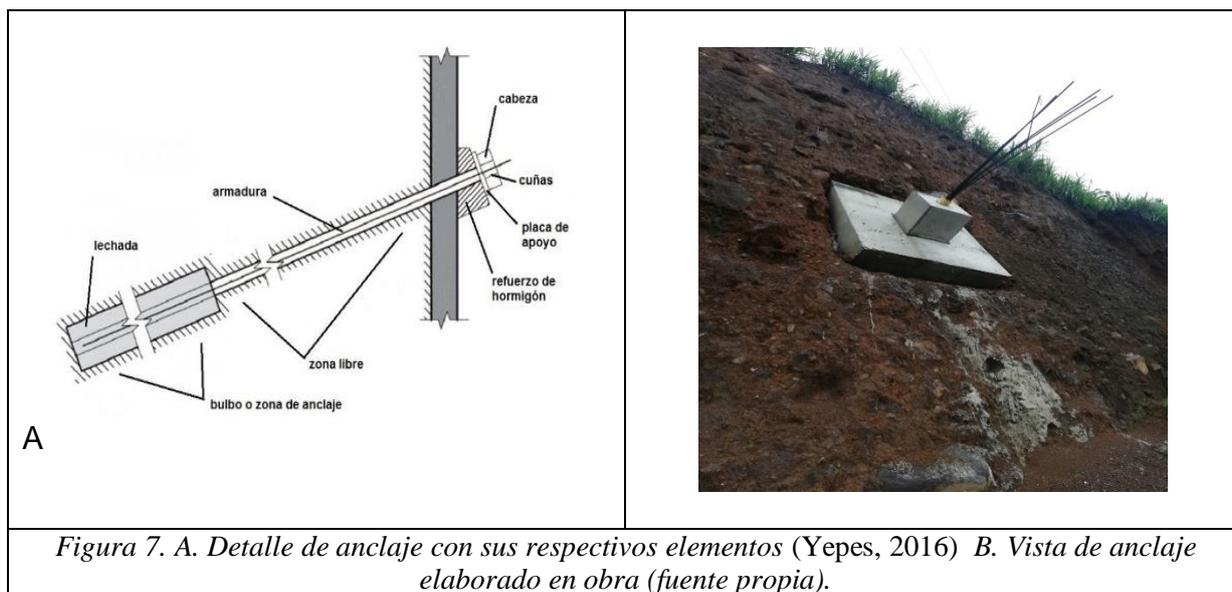


Figura 7. A. Detalle de anclaje con sus respectivos elementos (Yepes, 2016) B. Vista de anclaje elaborado en obra (fuente propia).

En los anclajes se distinguen las siguientes zonas:

- ❖ Zona o bulbo de anclaje: Es la parte encargada de transferirle los esfuerzos al terreno. Teóricamente se trata de una parte fija, es decir, no se mueve ni durante el tensado ni durante la movilización del empuje activo.
- ❖ Zona libre: Como se observa en la figura 7A, es la parte en la que la armadura es independiente del terreno que la rodea, de forma que está libre su deformación al tensionarse. En efecto, la capacidad de deformación de esta zona libre es la que provoca la progresiva puesta en carga del anclaje. Conviene una longitud mínima de unos 5 m para que el esfuerzo aplicado se vea poco afectado por los posibles desplazamientos de la cabeza respecto a la zona de anclaje al terreno. Puede garantizarse la independencia del anclaje respecto al terreno en esta zona mediante camisas de PVC o metálicas. Es importante garantizar su protección contra la corrosión.

- ❖ Cabeza: es la unión de la armadura a la placa de apoyo, sobre la que se ejerce la fuerza estabilizadora sobre la estructura. Un ejemplo de este se puede ver en la figura 7B.

El sistema de estabilización propuesto para los taludes aferentes a las torres de energía ubicadas en proximidad de las abscisas K78+450 y del K78+645, se compone de sistema de anclajes de 12 m de bulbo e inclinados 15° respecto a la horizontal. El diámetro de perforación será de 100 mm, compuestos por 5 torones de 1/2 pulgada, el espaciamiento será de 2,75 y 3,00 m en sentido longitudinal y vertical respectivamente (EVALTEC S.A, 2019). La información correspondiente de este diseño se puede constatar en la tabla 1.

Tabla 1. Configuración del refuerzo mediante anclajes (EVALTEC S.A, 2019).

Nails	Nivel desde la Base	Long. Total (m)	Tensión Adm. (Ton)	Separación Horizontal (m)	Longitud Bulbo (m)	Inclinación (grados)	No. cables 1/2
Fila 12	35.65	33	45	2,75	12	-15	5
Fila 11	32.65	33					
Fila 10	29.65	33					
Fila 9	26.65	33					
Fila 8	23.65	30					
Fila 7	20.65	30					
Fila 6	17.65	30					
Fila 5	14.65	30					
Fila 4	11.65	25					
Fila 3	8.65	25					
Fila 2	5.65	25					
Fila 1	2.65	20					

Partiendo de lo mencionado anteriormente, como parte indispensable de este proceso, se desea complementar los trabajos donde no es necesario utilizar los anclajes de diseño, utilizando otros procedimientos constructivos. Entre ellos, en este proyecto, se proponen dos de las alternativas más prácticas como lo son los cortes - terracedos y los sistemas de mallas flexibles (mallas de control de caída de bloques). Dichos procedimientos se combinarán con el sistema de anclajes

concebido originalmente, de tal manera que se elija una propuesta eficaz en términos técnicos y económicos.

Cortes y terracedo

Este sistema de estabilización se refiere a la posibilidad de variar las inclinaciones del terreno, dependiendo de los cálculos de estabilidad realizados previamente, aquí es necesario utilizar maquinaria pesada para disminuir el volumen de la ladera y evitar la posibilidad de desestabilización. Por otra parte, el terracedo se considera como el procedimiento de corte llevado a cabo continuamente, generando un tipo de escalera, donde la ladera poco a poco disminuye su inclinación con un descanso que proporciona seguridad y la posibilidad de dirigir la filtración del agua.

Sistema de mallas flexibles

Los sistemas flexibles son otra alternativa que cumple con los requerimientos, en este caso se debe de tener presente que, las caídas de piedras y flujos de detritos pueden causar daños a personas y bienes, siendo estos fenómenos comunes en taludes conformados con bloques y matriz friable si no se garantiza la protección de la cara de los taludes. Un sistema flexible es utilizado para retener la caída de piedras, compuesto por una malla y cierta cantidad de pernos que se aferran de manera perpendicular al suelo para garantizar su funcionamiento.

Estas dos alternativas son fuente de economía a la hora de realizar una comparación respecto a la implantación de anclajes en los taludes y su implementación garantiza la seguridad del sector.

Metodología

Para el desarrollo de los objetivos propuestos se proponen las actividades descritas a continuación:

❖ Revisión de la cartografía de la topografía y geología del sector de interés.

La elaboración de un concepto claro en un corredor vial significó, revisar detalladamente la topografía existente del lugar, procesando la información que se extrajo de las bases de datos cartográficas del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) y de los planos de diseño presentados por el INVIAS.

Inicialmente, se realizó la localización del proyecto según los datos expuestos por el INVIAS junto con las abscisas de cada tramo e información extraída de la plataforma digital Google. A continuación, se buscaron las características geológicas de la zona y para esto se utilizó el mapa realizado por el IGAC - Plancha 165, el cual fue comprado por el consultor para poder elaborar un reconocimiento e informe más detallado. Con éste, se lograron evidenciar algunas cualidades del sector y se establecieron los puntos de interés claves para el desarrollo de la propuesta como lo es la localización de las torres de energía dentro del proyecto.

❖ **Identificación de posibles amenazas a lo largo del tramo de interés.**

Para la identificación de algunas amenazas, fue necesario apoyarse en la información disponible de la topografía del sector y buscar las zonas donde las curvas de nivel presentaran mayor proximidad, ya que esto representaba las pendientes más elevadas y críticas.

De igual manera para descartar criterios geológicos complejos, se trabajó sobre la proyección de la plancha 165 del IGAC donde se buscó identificar fallas próximas a la zona de trabajo y se procedió continuamente a reconocer qué tipo de materiales podrían ser encontrados según dicho documento.

Una vez llevado a cabo este trabajo de auscultación, se reservaron datos relevantes y se discretizó la zona.

❖ **Revisión de las inclinaciones de los taludes en la zona de proyección.**

Para lograr esta revisión, se midió en planta las distancias horizontales de cada curva de nivel. Más adelante, se tomaron los datos de las cotas con la curva de nivel correspondiente y así fue posible obtener la inclinación del lugar considerado como necesario, en este caso, se evaluaron los sectores aferentes a las torres que fue nuestro sitio de interés utilizando un modelo como el que se muestra en la figura 8.

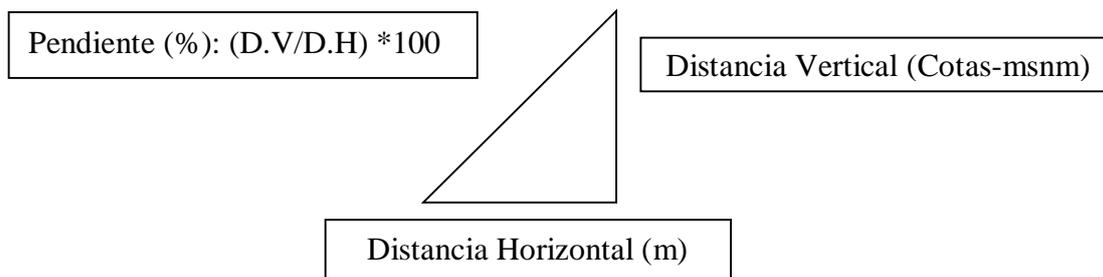


Figura 8. Modelo para la revisión de inclinación del talud en las zonas de proyección (Elaboración propia).

❖ **Inspección del cumplimiento de las normativas aplicables a la problemática tratada.**

Las reglas o normativas en un país son necesarias para establecer criterios básicos dentro de los estudios geotécnicos, estructurales o hidráulicos. Por tal motivo, luego de tener claro factores como ubicación, trazado y características geomorfológicas, se revisó de manera detenida en la Norma Sismo Resistente Colombiana cuáles eran algunos de los requisitos que deberían de cumplirse en todo proyecto, tales como la sismicidad, los factores de seguridad, valores predeterminados o de referencia, entre otros.

Por tratarse de una zona donde concurren diferentes factores, entre ellos la presencia de las torres de energía junto con la proximidad del río, se buscaron criterios geotécnicos dentro de algunos libros especializados en el tema.

En nuestro país se ha construido la infraestructura basada en la experiencia ingenieril y en la de otras naciones; se ha adoptado un sistema de procesos de muestreos y ensayos de laboratorio generales para llevar a cabo en exploraciones de campo. Partiendo de lo anterior, se consultó el manual del INVIAS donde se puede saber las especificaciones generales para la construcción

de carreteras y así poder determinar qué ensayos eran los necesarios y se procedió a elaborar cada uno de ellos. Entre los más importantes, se encuentran los límites de consistencia, la clasificación granulométrica y las densidades de cada uno de los materiales.

❖ Realización de visitas de campo para identificación de zonas y demás observaciones geotécnicas y geológicas que puedan servir para corroborar información primaria y secundaria del proyecto.

El sitio de interés está ubicado a pocos kilómetros del departamento de Antioquia, entre las abscisas K78+392 y K78+750, es por esto que las visitas de campo fueron realizadas en automóvil, permitiendo observar de primera mano la transitabilidad del sector y las características geológicas, morfológicas e incluso situación social y medio ambiental del sector.

Dentro de la zona de estudio se realizaron algunas visitas, teniendo como objetivo principal la revisión general del sitio de interés, donde fue importante que los constructores elaboraran algunas calicatas para tener una mejor visión del interior del suelo a lo largo del trazado, esta actividad se realizó con la compañía del ingeniero especialista en geotecnia y del geólogo encargado de caracterizar la zona.

❖ Análisis de información obtenida en campo y resultados de ensayos de laboratorio de suelos.

Una vez obtenida la geología, la topografía del lugar y los mapas delimitados con sus respectivas pendientes, la información fue recopilada y digitalizada en hojas de cálculo de tal manera que fuera sencillo analizar y dirigir la información a los ítems desarrollados dentro de

los resultados, de igual forma ocurrió con los ensayos de laboratorio. Este proceso fue llevado a cabo con el fin de determinar los parámetros que serían utilizados para el cálculo de la estabilidad, además, fue fundamental a la hora de conocer la estratificación del suelo y saber en qué puntos era necesario la utilización de los anclajes.

❖ **Cálculo de la estabilidad de los taludes que sean identificados en el proceso.**

Los cálculos se hicieron partiendo de algunos criterios fundamentales. Para este caso se tomó la situación más crítica que fue la estabilidad con las torres de energía, representando una sobrecarga. En consecuencia, se determinaron parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción, que ayudaron a determinar el tipo de suelo que se usaría para los cálculos. Además, las normativas consultadas fueron utilizadas para tener un estimativo dentro de los cálculos y definir si era posible o no llevar a cabo la estabilidad planteada.

Finalmente, los procedimientos generales de este apartado fueron realizados con el programa Rocscience Slide, el cual proporciona el análisis de estabilidad de una ladera o talud de manera rápida y completa.

❖ **Elaboración de diagnóstico preliminar según los problemas geotécnicos identificados.**

Para este proceso, fue posible evidenciar el detrimento de la zona y la poca influencia de las entidades gubernamentales, cumpliendo un rol con muchas deficiencias. La situación actual de los corredores viales en Colombia es en su mayoría, de un nivel de servicio con flujo bajo o

intermitente, fue por esto que se pensó en la idea de mejorar la transversal Quibdó-Medellín y optimizar el flujo, buscando estabilidad y altas velocidades de operación.

Luego de realizar las visitas correspondientes y de examinar las características del terreno tanto en planos como en laboratorio, se entendió a fondo la condición de estabilidad y se logró identificar algunas discontinuidades y pendientes que generan un problema de importancia en la proyección del corredor vial. Para esto fue necesario realizar un contraste entre el alcance del proyecto y las posibles soluciones geotécnicas.

❖ Desarrollo de propuestas alternativas para la estabilización de taludes en el tramo de interés.

El desarrollo de las propuestas se llevó a cabo con los indicios preliminares que invitaron a estudiar la zona, con la idea de realizar cortes a lo largo del trazado donde se recomendó evitar el cuerpo de agua adyacente al diseño geométrico. Se pudo observar que en algunos sectores la inclinación de los taludes era de gran magnitud y la filosofía de diseño no aplicaba en zonas críticas. Es por esto que la opción de estabilizar con anclajes fue el mejor resultado de las alternativas. Por otra parte, se observó que el suelo podría ser estabilizado satisfactoriamente con cortes en ciertos sectores.

Se desarrollaron las propuestas observando situaciones similares en otros proyectos tales como la Variante Medellín-Caldas y algunos sectores de la conexión Pacífico 1 y que fueron utilizadas de manera correcta, por lo tanto, han logrado una estabilización adecuada.

Algunas de las opciones se rigieron por la capacidad de compra de predios por parte del contratista y por la inclinación necesaria que fuera determinada a partir de la estabilidad. Sin embargo, en los taludes próximos a las torres, según los lineamientos, el sistema de estabilización no pudo ser modificado.

❖ **Compilación en un informe de los análisis de las alternativas planteadas con la reducción del costo.**

Finalmente, se desarrolló una compilación de la información primaria y secundaria, donde se explicó detenidamente el desarrollo de las actividades preliminares y posteriormente se dio solución al lugar de trabajo, teniendo en cuenta características como la localización, la geología, las visitas, las exploraciones, los cálculos pertinentes y las posibles alternativas teniendo en cuenta la efectividad de las mismas y la facultad de ahorrar significativamente dinero a los interesados.

Para disminuir los costos de trabajo, se pensó en la manera de disminuir la cantidad de anclajes en el sector, afectando lo menos posible la estabilidad. Se buscaron fuentes confiables de información y que fueran especializadas en el tema. Más adelante, con los cortes establecidos se observaron los cambios más significativos utilizando las ideas presentadas en las alternativas planteadas.

Resultados y análisis

Topografía y geología

La información topográfica del corredor se consideró para visualizar de una manera más amplia las características principales del sitio de interés. Algunas de las actividades clave fueron la ubicación espacial del tramo y la separación entre las torres de energía. La figura 9 muestra la ubicación espacial del tramo y la separación entre las torres de energía. La figura 9 muestra la localización general de la zona, ubicada dentro del territorio colombiano.



Figura 9. Localización general del sector de zona de impacto ubicada en el Carmen de Atrato, Municipio del Departamento del Chocó, Colombia (Google Maps, 2019).

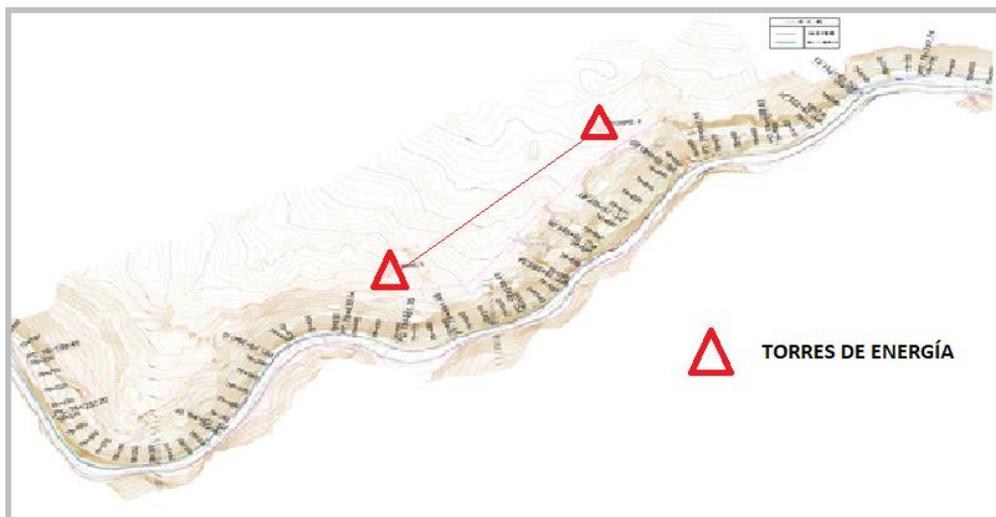
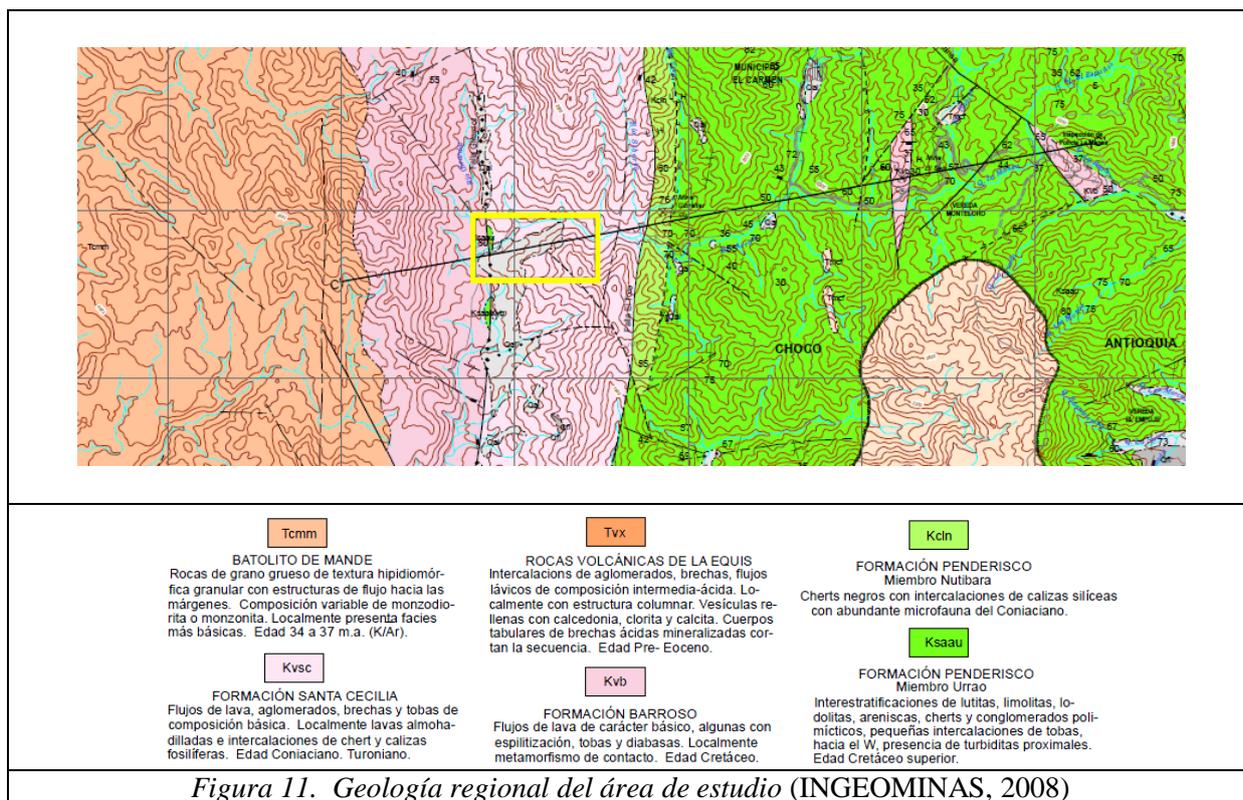


Figura 10. Topografía ajustada por el contratista para el sector de las torres de energía en proximidad de las abscisas K78+450 y del K78+645 (EVALTEC S.A, 2019).

La topografía mostrada en la figura 10, fue ajustada por el contratista, solventando problemas como vacíos en algunos sectores, correcciones en algunos empalmes anteriores y se garantizó un trazado vial eficiente, con un nivel de servicio óptimo a lo largo de la obra. Además, se puede observar la distancia entre las torres de energía de forma horizontal, demostrando que, dado su amplia longitud, es posible sectorizar el corredor para no tener que producir anclajes de manera continua y poder economizar la solución geotécnica.

Una vez ubicado el sitio de estudio geográficamente, se utilizó la Plancha 165 realizada INGEOMINAS mostrada en la figura 11, para conocer las características geológicas y corroborar en obra dicha información.



Se concluyó que las rocas sedimentarias que afloran en el corredor de la vía hacen parte del Miembro Urrao de la Formación Penderisco y son de edad Cretácea, por otro lado, las rocas volcánicas presentes en la vía pertenecen a la Formación Barroso y son de edad Cretácea Inferior, emplazadas tectónicamente dentro de las formaciones sedimentarias marinas (INGEOMINAS, 2008).

La cordillera Occidental se anexó al continente mediante procesos de acreción que tuvieron lugar debido al choque de la placa marina de Nazca, empujando en el sentido W-E, y la placa suramericana continental empujando en el sentido E-W, procesos que continúan en la actualidad. Durante el proceso de acreción, la cordillera fue intruida por varios cuerpos de rocas ígneas como el Batolito de Mandé y el de Farallones, cercanos al área del proyecto, que introdujeron fluidos mineralizantes (INVIAS, 1998).

Amenazas identificadas en la zona

Como consecuencia de la complejidad del marco geológico y tectónico, se evidenció que la cordillera presenta replegamientos de estratos y fallas de carácter regional y otras de menor magnitud, algunas de las cuales son activas hoy en día en una región de alta sismicidad. La figura 12, proporciona ilustración de la situación del lugar.



Figura 12. Zonas amenazadas por inestabilidad (Fuente propia).

La presencia de fallas con amplias zonas de influencia, asociada a una estratigrafía heterogénea, en una región de alta precipitación pluvial, explica la causa de inestabilidad, remoción en masa, deslizamientos, flujos de lodos y detritos.

Algunas zonas contienen un mayor nivel de complejidad, aunque dentro del marco geológico no se determinan fallas existentes que puedan deteriorar la estabilidad a largo plazo, se puede notar según la figura 13 que debido a las altas inclinaciones del sector (El cual es determinado en la topografía gracias a la proximidad entre curvas de nivel) y a la proximidad de estas con el corredor vial, es necesario llevar a cabo obras de estabilidad de taludes que protejan la integridad del tránsito diario.



Figura 13. Zona crítica identificada en el proceso de auscultación vial (Fuente propia)

Cálculos y análisis de inclinaciones

Con la información topográfica fue posible analizar la altura de los cortes proyectados y de los cortes existentes. En la tabla 2 se muestran los taludes proyectados a lo largo del proyecto de acuerdo a las alturas y ha sido identificado en campo gracias a la figura 14, posteriormente en la tabla 3 se muestra un cuadro resumen de todas las pendientes y alturas de los cortes existentes en la zona de estudio, y así tener una primera aproximación de la estabilidad.

Tabla 2. Cuadro resumen de los taludes proyectados (EVALTEC S.A, 2019).

Abscisa (i)	Abscisa (f)	Taludes Existente			Observación
		Altur a Máx.	Altur a Mín.	Altur a Prom .	
K78+400	K78+425	24.5	18.6	21.5	1
K78+425	K78+475	34.3	24.5	29.4	Torre 1 (2)
K78+475	K78+555	38.6	28.1	33.35	3
K78+555	K78+580	28.1	12.2	40.3	4
K78+580	K78+620	37.1	23.9	30.5	5
K78+620	K78+670	37.3	19.4	28.35	Torre 2 (6)
K78+670	K78+910	33.8	3.9	18.85	7

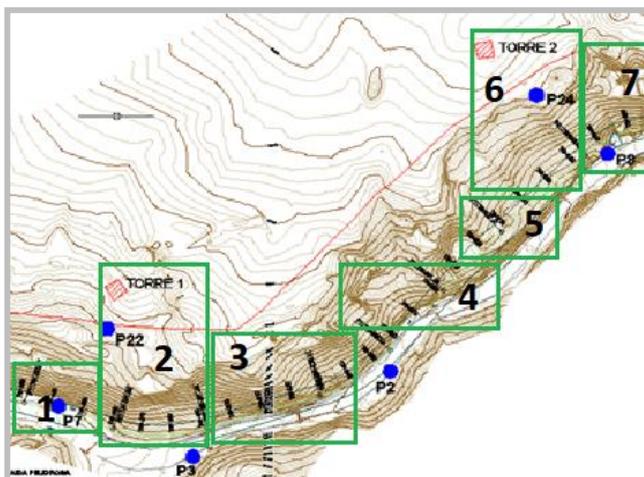


Figura 14. Ubicación en la topografía utilizada de los cortes realizados para el análisis de las inclinaciones (Elaboración propia).

En la Tabla 3 se presenta un resumen de la geometría de los taludes existentes que varían entre 57° y 71° donde se observa que predomina una pendiente promedio de 63° .

Tabla 3. Cuadro resumen de los cortes existentes (EVALTEC S.A, 2019).

Abscisa	Altura corte (m)	Inclinación corte ($^\circ$)	Inclinación ladera ($^\circ$)
K78+385	9.33	71	47
K78+410	9.36	66	52
K78+420	14.46	62	53
K78+425	18.36	68	48
K78+430	20.65	66	45
K78+445	26.17	65	20
K78+685	27.49	57	21
K78+690	24.64	61	24
K78+805	15.65	59	33

De la revisión de los cortes existentes, se encontró que en altura predominan cortes de 15 m a media ladera y de 24 m cuando la pendiente del talud tras el chaflán tiende a ser menor de 20 grados. En general, para realizar los cortes proyectados es necesario buscar alternativas de sostenimiento ya que son pendientes relativamente altas.

Los taludes están conformados por un depósito como se muestra en la figura 15, el cual se caracteriza por estar conformado de bloques sub redondeados en una matriz limo-arenosa

disgregable, dichos bloques alcanzan hasta 5 metros de diámetro y corresponden a rocas volcánicas tipo basalto.



Figura 15. Zonas identificadas como depósito (Fuente propia).

Normativas

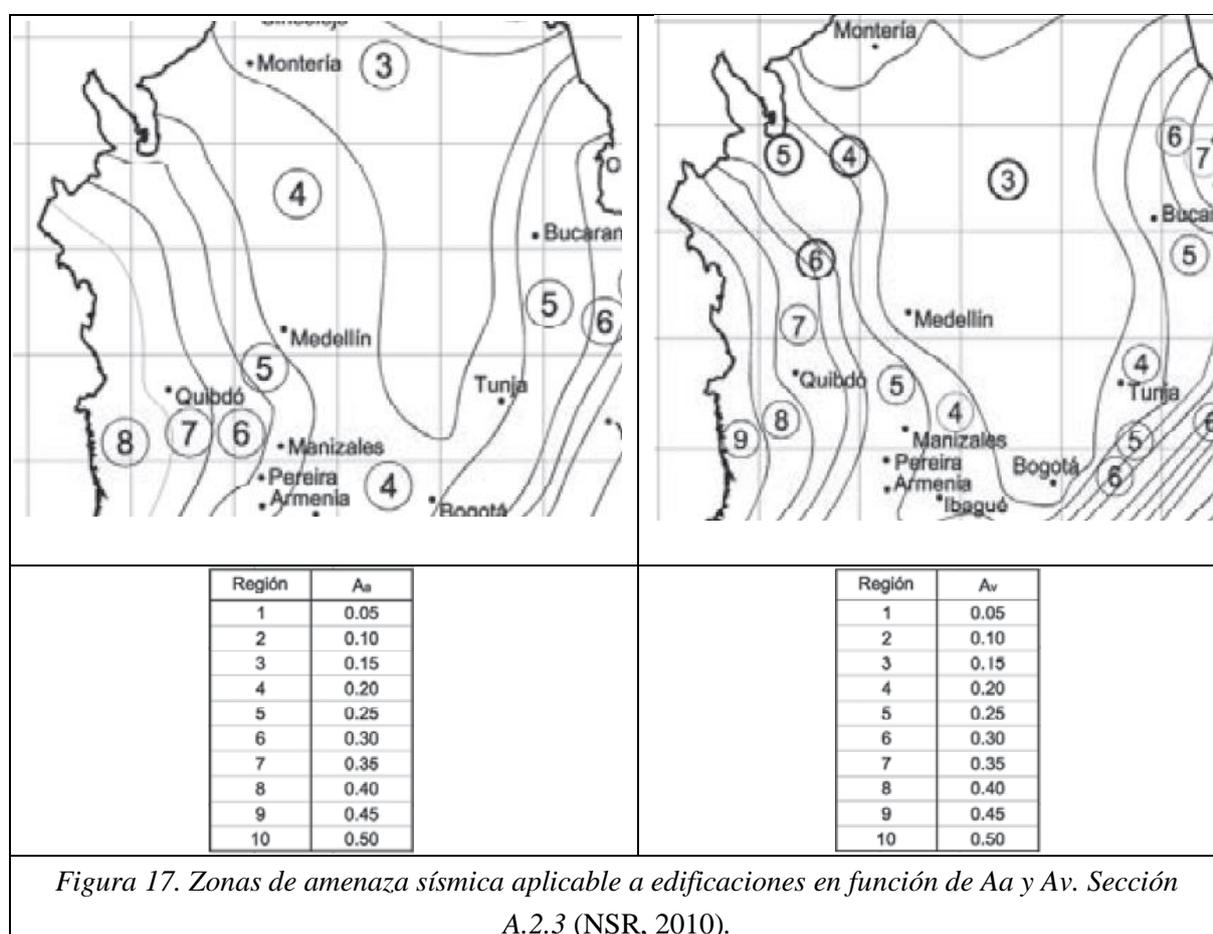
Como primera medida, se consultó la metodología de trabajo para los estudios geotécnicos dentro del Reglamento Colombiano de Normas Sismo Resistentes, resaltando como se evidencia más adelante, algunas de las características necesarias a desarrollar según el título H (Figura 16).

A.1.5.4 — ESTUDIO GEOTÉCNICO — Para efectos de obtener una licencia de construcción debe presentarse un estudio geotécnico realizado de acuerdo con los requisitos del Título H del presente Reglamento. El estudio geotécnico debe ir firmado por un ingeniero civil facultado para ese fin, y debe hacer referencia a:

- (a) Lo exigido en A.1.3.2,
- (b) A la definición de los efectos locales exigida en A.2.4, incluyendo el caso en el que se realice un estudio sísmico particular de sitio según lo indicado en A.2.10,
- (c) A la obtención de los parámetros del suelo para efectos de la evaluación de la interacción suelo-estructura tal como la define el Capítulo A.7, cuando esta es requerida por el Capítulo A.3, y
- (d) A las demás que exija el Título H.

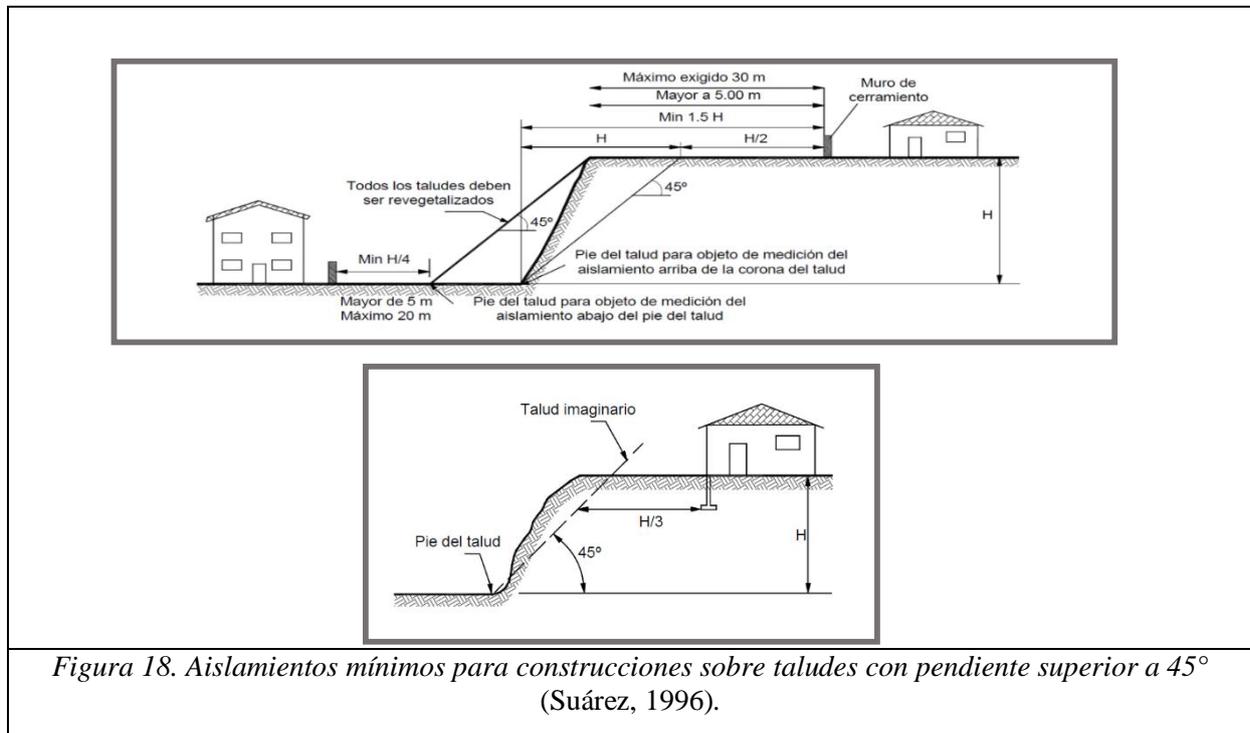
Figura 16. Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. Capítulo A (NSR, 2010).

Así mismo, se tomaron los valores importantes de referencia en cuanto a la localización del proyecto según la norma, las cuales tienen efecto cuando evalúa la estabilidad de la zona según la tendencia al movimiento que presente, se constataron los valores de la aceleración pico efectiva A_a y Velocidad pico efectiva A_v , utilizados en la figura 17. Dichos valores son necesarios para poder llevar a cabo la modelación de la estabilidad y permitir el cálculo de las alternativas.



Las torres de energía establecen ciertas limitantes en el proyecto que son de gran importancia, entre ellos y como lo muestra la figura 18, se encuentra la distancia mínima o los aislamientos que son áreas junto al pie o corona de taludes o laderas, en las cuales no se permite la

construcción de edificaciones. Estas zonas, generalmente se destinan como áreas de protección contra los deslizamientos (Suárez, 1996).



Lo anterior, generó revisar con cuidado los procedimientos y recomendaciones en el sitio de interés. La empresa a cargo de la línea de transmisión de energía proporcionó datos que permitieron determinar un limitante adicional relacionado con la seguridad de las estructuras, éste se refiere a que el chaflán del corte vial debe estar a más de 15 m de distancia de la base de las torres para evitar afectar la cimentación de las estructuras por pérdida de confinamiento. Dicha situación se constató en la figura 19, realizada por el diseñador vial de la obra en proceso, utilizando las secciones del trazado y marcando cortes al medio.

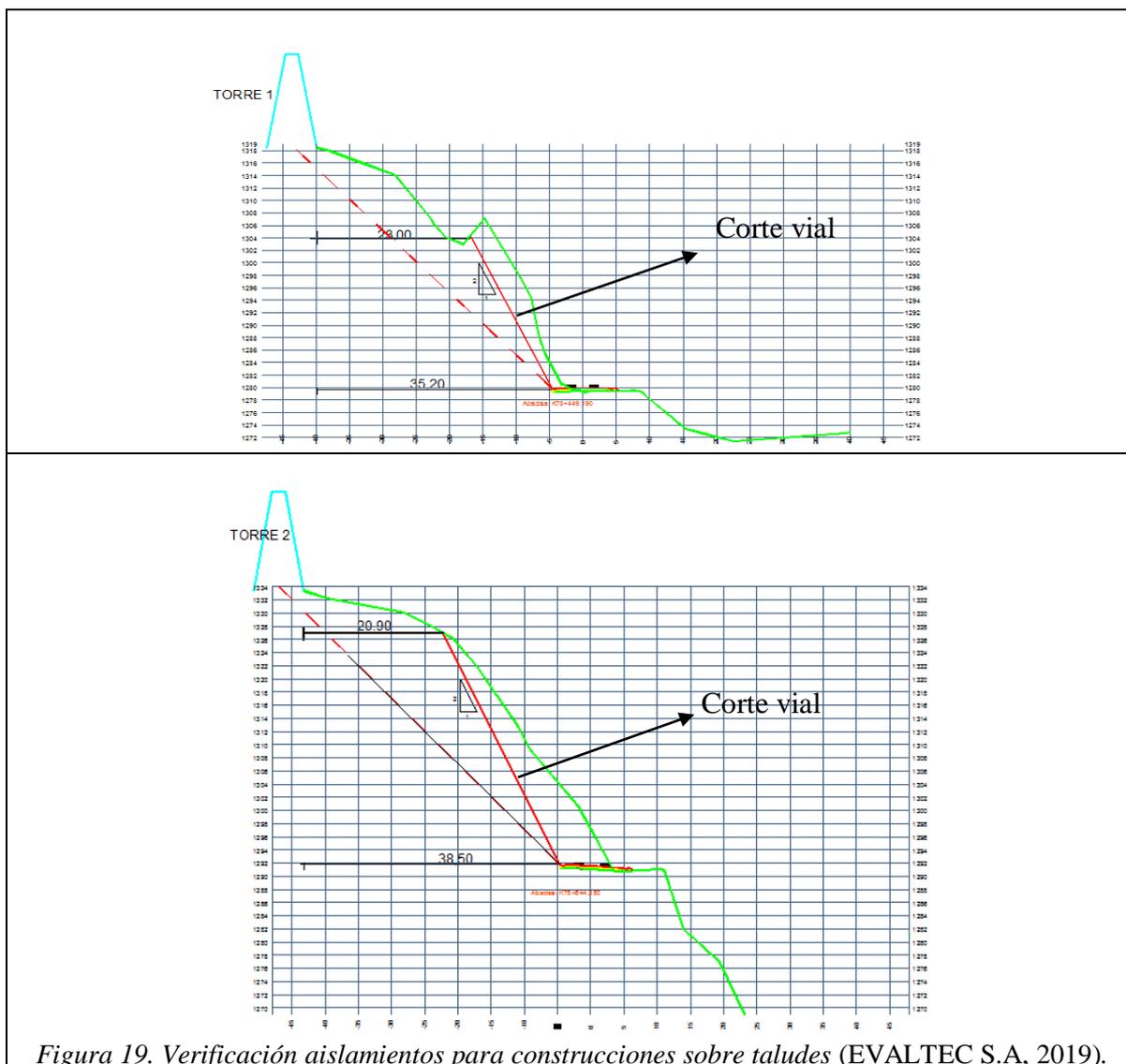


Figura 19. Verificación aislamientos para construcciones sobre taludes (EVALTEC S.A, 2019).

Adicionalmente, durante el proceso de revisión de las normas, se tomó como referencia el Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras desarrollado por el Instituto Nacional de Vías, cuyo propósito fue estandarizar los procesos de muestreo y ensayo en los laboratorios que realizan pruebas sobre la infraestructura de la carretera nacional (INVIAS, 2013). A demás, para poder tener presente los cálculos en las rocas se utilizó la norma ASTM del 2014 que hace referencia al ensayo de resistencia a la compresión y módulos elásticos.

En la tabla 4 se presentan los ensayos que fueron utilizados para lograr la descripción de los materiales obtenidos mediante sondeos a diferentes profundidades, en los cuales se recuperaron muestras representativas y fueron trasladadas a las oficinas de EVALTEC S.A para continuar con los debidos procesos:

Tabla 4. Normas utilizadas para caracterizar los materiales de la zona de impacto (EVALTEC S.A, 2019).

Nomenclatura	Descripción
INV E-123-13	Análisis granulométrico de suelos por tamizado
INV E-102-13	Descripción e identificación de suelos (Procedimiento visual y manual)
INV E-125-13	Determinación del límite líquido de los suelos
INV E-126-13	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (Índice de plasticidad)
INV E-122-13	Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado
INV E-128-13	Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral
INV E-152-13	Compresión inconfiada en muestras de suelos
INV E-154-13	Determinación de la resistencia al corte método de corte directo (CD) (Consolidado drenado)
INV E-223-13	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso
ASTM D7012-14	Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

Observaciones geotécnicas

Algunas de las revisiones más importantes que se hicieron en las visitas técnicas se muestran en la figura 20, donde se pudo evidenciar las altas inclinaciones del terreno al lado del corredor vial, el estado constructivo de las obras, algunos cuerpos de agua importantes y concordancia de las características geológicas del sector con lo esperado previamente.



Figura 20. Imágenes de las visitas realizadas al proyecto (Fuente propia).

Durante los recorridos que se llevaron a cabo fue posible evidenciar los continuos cambios que se producen en los taludes próximos al corredor vial. Todo esto, debido a una composición débil ya que la geología mostraba una formación que todavía no ha logrado confinarse de tal manera que no haya flujo de detritos en el sector. Por otro lado, en la mayoría del sector se presenta continuos flujos de agua y por ende nivel freático relevante dado que, según lo investigado, es una zona con altos niveles de pluviosidad.



Figura 21. Material observado en recorridos de campo (Fuente propia)

En general la matriz aumenta su compacidad o consistencia a medida que se profundiza en el perfil, evidenciando procesos de consolidación por la sobrecarga que aceleró la expulsión de agua y desarrolló adicionalmente algunos procesos de cementación leve por la presencia de minerales como hierro y/o calcita (EVALTEC S.A, 2019).

Teniendo en cuenta las características de los materiales observados en la figura 21 no fue posible establecer una sectorización lateral de los depósitos de vertiente, por lo que se consideró todo el tramo como una unidad homogénea.

Con base en el programa de exploración realizada en el sector, se subdividió el depósito en dos estratos con condiciones mecánicas diferentes. El estrato superior con espesor variable entre 3.0 y 6.0 metros compuesto por limos arenosos con fragmentos de roca donde fue posible realizar el ensayo de penetración estándar, subyacido por un depósito de mayor compacidad compuesto por bloques de roca embebidos en una matriz limo arenosa o limo arcillosa compacta, que se extiende hasta la profundidad explorada (EVALTEC S.A, 2019).

La transitabilidad del lugar se ha visto afectada por el continuo paso de camiones pesados o de más de dos ejes, siendo un problema que poco a poco aumenta el deterioro de la calzada actual y que debido a los malos manejos se encuentra construida por partes, como se muestra a continuación en la figura 22.



Figura 22. Zonas de tránsito deterioradas identificadas en visita técnica (Fuente propia).

Esta situación se presenta a lo largo del corredor y se puede deducir que la población se ve vulnerable gracias a la cantidad de condiciones críticas que viven a diario, en relación con aspectos como el polvo, el continuo tráfico con altas cantidades de smog, la continua deforestación de la flora y por ende el desplazamiento forzado de la fauna, los cuales son índices que demuestran la falta de apoyo institucional por parte del gobierno.

Información obtenida, exploraciones de campo y ensayos de laboratorio

Las perforaciones son una de las actividades preliminares de todo proyecto, porque dan una descripción detallada de lo que puede contener el espacio de trabajo, además, estas permitieron

obtener muestras de los materiales involucrados para una mejor caracterización, valores que serán usados en las modelaciones posteriores.

Los sondeos, aunque son buena fuente de información, pueden tener variaciones que dependen del operador de la máquina, el clima, el nivel freático y su correcta identificación, entre otros. Se puede destacar que, en su mayoría, los resultados concuerdan con lo esperado dentro de los estudios previos y que las unidades litológicas se encuentran en el orden preestablecido por la investigación geológica.

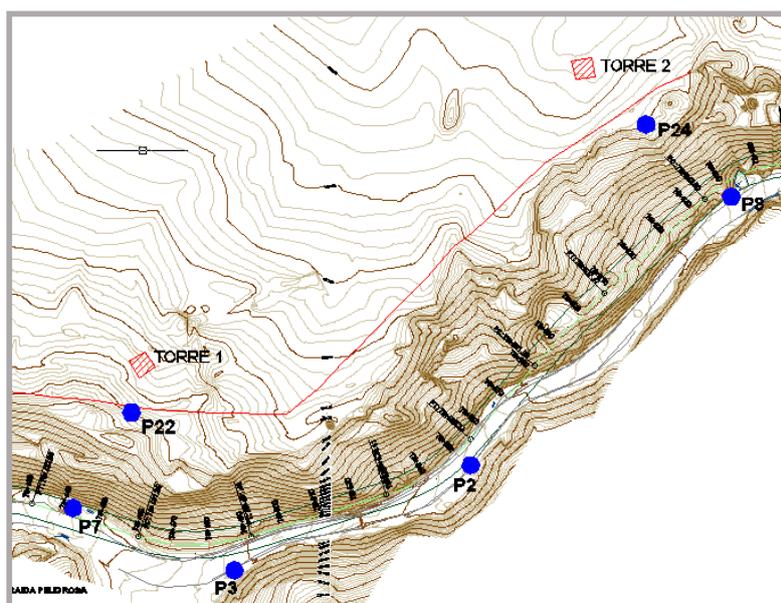


Figura 23. Localización de las perforaciones realizadas (EVALTEC S.A, 2019).

Una vez llevadas a cabo las perforaciones con la localización estipulada en la figura 23, se determinó el perfil estratigráfico mostrado en la figura 24, donde se puede apreciar de manera general el marco geotécnico.

ABSCISA	K78+440	K78+450 (T)	K78+485	K78+550	K78+645 (T)	K78+650
PERFORACIÓN No.	P7	P22	P3	P2	P24	P8
COTA (m.s.n.m)	1279	1315	1282	1286	1329	1291
PROFUNDIDAD(m)	19	20	17,5	18	27	7
NIVEL FREÁTICO(m)	7	0,55	6	NR	8	3
PROFUNDIDAD(m)	ESTRATIGRAFÍA					
0,00		N.F				
1,00		MH		SM		
2,00					ML, GM, SM	N.F
3,00						
4,00						
5,00			N.F			
6,00	N.F					SC
7,00					N.F	
8,00			ROCA			
9,00						
10,00	ROCA	DEPÓSITO		ROCA		
11,00						
12,00					DEPÓSITO	
13,00						
14,00						
15,00						
16,00						
17,00						
18,00						
19,00						
20,00						
21,00						

Figura 24. Resumen estratigráfico de los sondeos en el sector (Elaboración propia).

De este resumen estratigráfico es posible deducir que en general la zona está delimitada por dos tipos de suelo, uno un poco menos denso que el otro, pero los dos son de vital importancia dentro de las consideraciones geotécnicas, ya que, tienen características que pueden ayudar al sostenimiento de la alternativa original de solución para evitar la erosión física de las laderas.

El proceso llevado a cabo con el SPT sirve para determinar los parámetros característicos del suelo del área de sondeo. Luego de unos metros de perforado, es usual cambiar el método de perforación cuando se presenta el rechazo. De la misma manera, la utilización de brocas diamantadas permite continuar con el trabajo de forma eficaz, siendo un mecanismo con el cual

se logran obtener datos de resistencia, efectuados sobre bloques de roca del depósito y se pueden obtener resultados como los mostrados en la tabla 5, luego de desarrollar ensayos como compresión simple, peso unitario, absorción.

Tabla 5. Resultados de ensayos en roca (EVALTEC S.A, 2019).

Muestra	Peso Unitario (Tn/m³)	Absorción	UCS (MPa)
P22 – T1 - M 6	3.02	0.9	92.3
P22 – T1 - M 7	3.01	0.8	94.5
P22 – T1 - M 8	3.01	0.8	122.7
P22 – T1 - M 11	2.89	0.7	167.8
P22 – T1 - M 12	2.97	0.9	310.0
P22 – T1 - M 13	2.82	1.2	334.3
P24 - T2 - M 11	2.89	1.4	91.9
P24 - T2 - M 13	2.91	1.1	56.2
P24 - T2 - M 14	2.82	1.5	53.5

En general, de acuerdo a la litología y la exploración en las torres este tramo contiene bloques subredondeados en una matriz limo-arenosa disgregable. Los bloques alcanzan de 4 a 5 metros de diámetro y corresponden a rocas volcánicas, superficialmente con un espesor entre 2 y 5 m se presentan arenas limosas de compacidad suelta y/o limos de alta plasticidad de consistencia media.

La determinación de los parámetros a la hora de evaluar es indispensable, así como su relación con la ubicación de los sondeos. En resumen, las tablas 6 y 7 presentan los resultados de los ensayos según el INVIAS, 2013.

Tabla 6. Resultados de sondeo de la torre 1 (EVALTEC S.A, 2019).

Profundidad(m)		DESCRIPCION DE CAMPO	Rocas		ENSAYO SPT.						GRADACION			LIMITE S				IL %	GE Kg/cm2	UCS
Ensayo de penetración			qu Mpa	RQD %	Resultados de campo (GOLPES / 6")			Valores Corregidos			W %	LL %	LP %	IP %						
De	A				6"	12"	18"	N g/p	N1 g/p	N60 g/p					% G	% A	% F			
	0.55																			
0.55	1.00	Limo de baja compresibilidad color café oscuro			3	3	5	8	15	8	14.6	28.0	57.4	48.1	61.0	44.0	17.0	0.2	2.64	MH
1.00	1.55	Limo de baja compresibilidad color café oscuro			6	3	3	6	11	6	15.8	11.9	72.4	49.4	58.0	47.0	11.0	0.2	2.62	MH
1.55	2.00	Arena limosa color café oscuro			10	22	48	70	116	65	26.5	32.4	41.1	41.1	48.0	35.0	13.0	0.5	2.62	SM
2.00	4.00	Fragmentos de roca color gris oscuro con vetas café																		
4.00	5.60	Fragmentos de roca color gris oscuro																		
5.60	8.60	Núcleos de roca color gris oscuro	92.3	64%																
8.60	9.60	Núcleos de roca color gris oscuro con vetas blancas	94.5	85%																
9.60	11.50	Núcleos de roca color gris oscuro	122	95%																
11.50	12.90	Fragmentos de roca color gris oscuro																		
12.90	13.50	Fragmentos de roca color gris oscuro																		
13.50	16.00	Núcleos y fragmentos de roca color gris oscuro	167	13%																
16.00	18.00	Núcleo y fragmentos de roca color gris oscuro	310	10%																
18.00	20.00	Núcleos y fragmentos de roca color gris oscuro	334	6%																

Tabla 7. Resultados de sondeo de la torre 2 (EVALTEC S.A, 2019).

Profundidad(m)		DESCRIPCION DE CAMPO	Rocas		ENSAYO SPT.						GRADACION			LIMITE S				IL %	GE Kg/cm2	UCS
Ensayo de penetración			qu Mpa	Rec. %	Resultados de campo (GOLPES / 6")			Valores Corregidos			W %	LL %	LP %	IP %						
De	A				6"	12"	18"	N g/p	N1 g/p	N60 g/p					% G	% A	% F			
0.55	1.00	Grava limosa color café con gris y amarillo	100%		2	3	2	5	8	5	26.9	24.4	48.7	35.7	52.0	43.0	9.0	-0.8	2.72	GM
1.55	2.00	Limo de baja compresibilidad color café	100%		2	2	3	5	7	4	22.0	25.7	52.3	29.0	48.0	37.0	11.0	-0.7	2.65	ML
2.55	3.00	Grava limosa color gris	100%		3	3	4	7	9	6	36.8	20.5	42.7	22.8	38.0	33.0	5.0	-2.0	2.70	GM
3.55	4.00	Limo de baja compresibilidad color gris con vetas	89%		3	3	4	7	8	5	19.0	25.4	55.7	24.3	40.0	35.0	5.0	-2.1	2.58	ML
4.55	5.00	Arena limosa color gris	89%		20	24	33	57	61	43	22.5	30.4	47.1	22.8	38.0	33.0	5.0	-2.0	2.66	SM
5.00	7.00	Fragmentos de roca color gris oscuro	10%																	
7.00	10.00	Fragmentos de roca color gris oscuro	20%																	
10.00	13.00	Fragmentos de roca color gris oscuro	20%																	
13.00	14.50	Fragmentos de roca color gris oscuro	13%																	
14.50	16.00	Fragmentos de roca color gris oscuro	40%																	
16.00	19.00	Núcleos de roca color gris oscuro	91.9	43%																
19.00	22.00	Núcleo y fragmentos de roca color gris oscuro	20%																	
22.00	23.50	Núcleo y fragmentos de roca color gris oscuro	56.2	23%																
23.50	27.00	Núcleo y fragmentos de roca color gris oscuro	53.5	26%																

Para lograr una caracterización del sector más amplia, en la tabla 8, se presentan algunos resultados del laboratorio de las exploraciones de campo realizadas cerca a la ubicación de las torres.

Tabla 8. Resultados de ensayos sobre perforaciones adyacentes a las torres de energía (EVALTEC S.A, 2019).

Perf.	Muestra No.	Profundidad (m)		Peso específico (SSS)		Relación L/D	Resistencia a la compresión (σ_c) (MPa)
		De	A	(Kg/m ³)	(MN/m ³)		
P2	5	2.0	4.0	2751	0.026	2.23	68.1
	14	14.0	15.0	2839	0.027	2.06	46.6
	15	15.0	18.0	2917	0.028	2.17	50.2
P3	2	1.5	3.6	3025	0.029	2.15	45.0
	4	5.0	7.0	3030	0.029	2.21	83.0
	5	7.0	8.5	2963	0.029	2.15	57.3
	7	10.0	11.5	2851	0.027	2.02	51.8
	8	11.50	13.0	3002	0.029	2.15	80.1
	9	13.0	14.0	2873	0.028	2.19	52.0
	10	14.0	17.5	2957	0.028	2.21	65.2
P7	3	11	12.5	2927	0.028	2.1	87.6
	4	12.5	14	2952	0.028	2.11	126.3
	6	15.5	16.5	2908	0.028	2.14	71.7
	8	18	19	2971	0.029	1.95	38.7
P8	3	5	7	2996	0.029	2.16	84.4
				2994	0.029	2.17	89.1

En general se encontró en los primeros metros un espesor variable de suelo compuesto por limos de baja plasticidad (ML), arena limosa (SM) y/o grava limosa (GM), seguido por un depósito conformado por bloques sub redondeados en una matriz limo-arenosa disgregable, continuando bajo el nivel de la banca actual un estrato mucho más competente compuesto de roca fracturada tipo basalto con superficies en diferentes grados de meteorización.

Los valores determinados en este punto se han implementado dentro de las modelaciones posteriores, catalogando solo dos tipos de material como lo muestra la estratificación; el

primero denominado depósito de limos y arcillas y el segundo ubicado a mayor profundidad como una formación de rocas fracturadas.

Cálculo de la estabilidad

Inicialmente, desde la geología se identificaron dos tipos de materiales con características mecánicas diferentes. Posteriormente, los sondeos lograron evidenciar, dentro de la zona crítica a evaluar, una estratigrafía como la descrita por el geólogo. Para realizar el cálculo de estabilidad es de vital importancia estimar los parámetros adecuados para llevar a cabo el proceso mediante el software escogido.

Una vez realizado el ensayo SPT, fue posible determinar los rangos típicos de los parámetros geomecánicos del suelo; teniendo en cuenta características como la plasticidad y el número de golpes. Por otro lado, gracias a los resultados de la resistencia de las rocas del depósito reportado en la estratigrafía preliminar, se puede asumir que el mismo actúa como un macizo rocoso desintegrado conformado por bloques y gravas (EVALTEC S.A, 2019). Para el último caso y según Vallejo (2002), para un basalto sano un ángulo de fricción básico puede oscilar entre 48° y 55° grados.

Lo anterior, permite escoger de manera más completa los parámetros geomecánicos para los materiales existentes en el sector.

Tabla 9. Parámetros para realizar el estudio de estabilidad con software (EVALTEC S.A, 2019).

Material	SPT	Cohesión	Angulo fricción	Peso Unitario
	N₆₀	kPa	φ (°)	kN/m³
Suelo fino	4-5/6	9-21	25	24
Depósito	Rechazo	89	43	18

Los factores de seguridad son indispensables para garantizar que los cálculos sean correctos y estén dentro de los rangos apropiados. En la tabla 10, se presentan los rangos de clasificación de factores de seguridad para el caso estático y pseudo-estático establecido por la NSR-10.

Tabla 10. Factores de seguridad básicos mínimos directos-Tabla H.2.4.1 (NSR, 2010).

Condición	F_{SISM}		F_{SISM}	
	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

Como se puede notar en la tabla 10, los valores que se encuentran allí son los mínimos permitidos para lograr el correcto funcionamiento de la estabilización. Además, es importante escoger un coeficiente de aceleración adecuado según la localización del proyecto, en este caso se utiliza 0.20g (por su cercanía al departamento de Antioquia) según la sección A.2.3 de la Norma Sismo Resistente Colombiana y mencionada con anterioridad en la figura 14 de las normativas generales.

Dentro de los análisis se contempla el coeficiente de presión de poros en condición estática y dinámica, el cual es un factor que se implementa fácilmente, pero la mayor dificultad está asociada con la asignación de este parámetro en diferentes partes del talud (Suarez, 1996). En ocasiones, el talud requiere de una extensiva subdivisión en regiones con diferentes valores (En este caso se utilizaron dos valores: 0.225 y 0.115). Dicho parámetro está determinado según la siguiente ecuación:

$$Ru = \frac{u}{\sigma_v}$$

Donde:

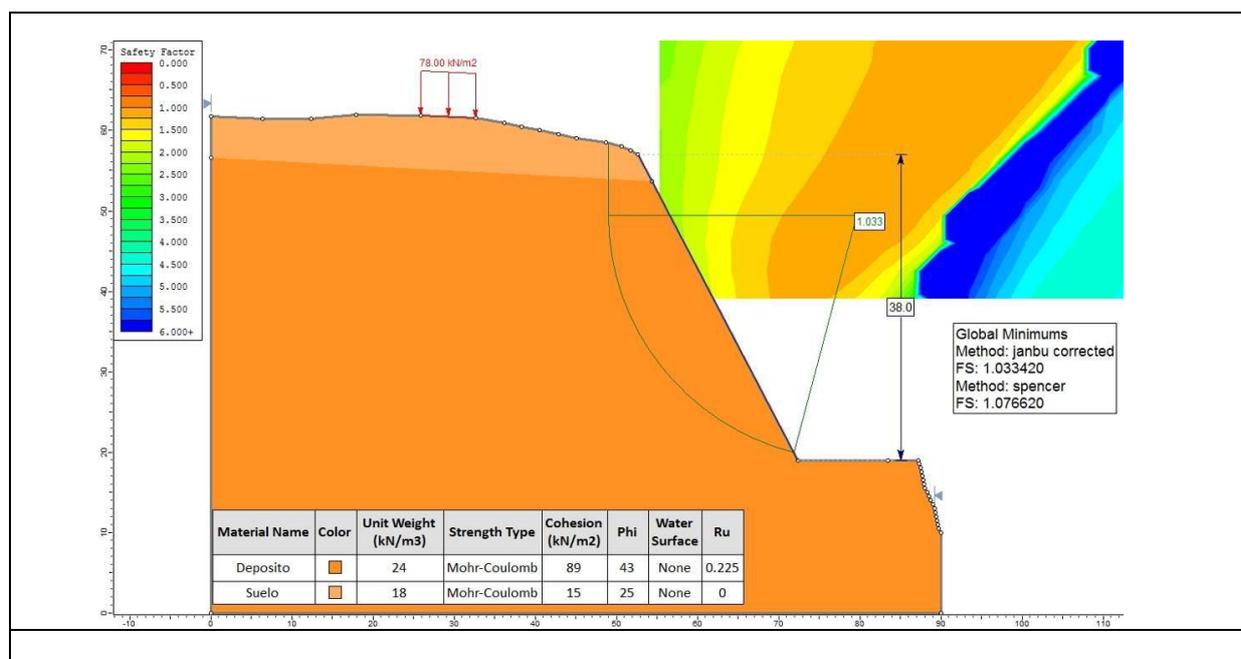
u = Presión de poros

σ_v = Esfuerzo total vertical del suelo a una profundidad z .

Una vez desarrollado el modelo en el software Slide, se lograron las proyecciones mostradas en la figura 25, junto con sus resultados enmarcados en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados de los análisis en los taludes sin refuerzo (EVALTEC S.A, 2019).

Sección	Análisis	Altura/ Inc. Ladera	F.S. Janbu	F.S. Spencer
K78+645-T2	Condición estática, $Ru = 0.225$	38.0m/12°	1.033	1.077
	Condición dinámica $Aa = 0.20$ g, $Ru = 0.225$		0.738	0.846
K78+450-T1	Condición estática, $Ru = 0.225$	29.5m/24°	1.261	1.233
	Condición dinámica $Aa = 0.20$ g, $Ru = 0.225$		0.898	0.953



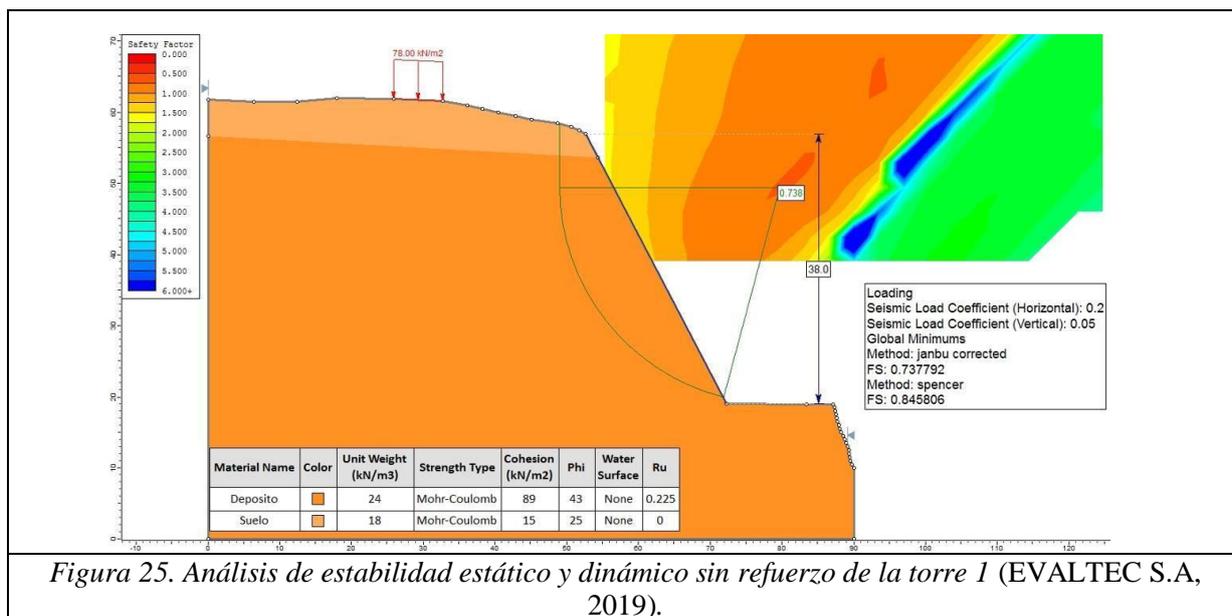


Figura 25. Análisis de estabilidad estático y dinámico sin refuerzo de la torre 1 (EVALTEC S.A, 2019).

Adicionalmente, como se puede evidenciar en la figura 21, luego de haber calculado la estabilidad del sector en la sección más crítica mediante un software, los factores de seguridad no cumplen con los valores requeridos y aceptados por el proyecto (caso estático 1.25 - 1.5 y caso dinámico 1.00 - 1.05), por lo cual no es posible dejar sin refuerzo ningún sector analizado y es necesario reproducir otros planteamientos que solucionen la estabilidad.

Diagnóstico preliminar

En el tramo K78+392 a K78+750 de la vía Transversal Quibdó-Medellín, no se observaron estructuras de terraplén considerables, por esto los diseños y los tratamientos hasta ahora efectuados fueron en pro de los cortes que se puedan hacer a lo largo del corredor, teniendo en cuenta la presencia del río Atrato en la margen derecha de la vía como lo muestra la figura 26, lo que implica la necesidad de alejarse del afluente mencionado.



Figura 26. Recorrido de la ruta 60 - transversal Quibdó-Medellín, con cuerpo de agua (Google Maps, 2019).

En el análisis de estabilidad de taludes se tiene como primer criterio de diseño, la disminución de la inclinación de los taludes con el fin de lograr pendientes apropiadas a los materiales presentes o que garanticen la estabilidad del talud a largo plazo (EVALTEC S.A, 2019). En este caso la disminución de la pendiente de los taludes de corte no es viable debido a la distancia requerida de aislamiento de las torres respecto a la corona del talud, mencionado en ítems anteriores. Con lo anterior, quedó claro que no fue posible realizar lo que se pensó en la etapa de planeación, donde se pretendía hacer cortes con inclinación 1H: 2V obteniendo un talud con altura máxima del orden de 40 m.

Dentro de los resultados de la modelación se puede observar que no se cumplen con los factores de seguridad incluso para el caso más crítico, reportando valores por debajo de 1.05 según lo planteado en la tabla 10. Es por esta situación que es necesario desde estos resultados, plantear soluciones que cumplan con los requerimientos mínimos y establezcan la seguridad respectiva que el proyecto amerita.

A partir de lo mencionado con anterioridad, la búsqueda de otras formas de estabilizar los taludes aferentes a la vía en desarrollo debe tener en cuenta que el suelo está determinado por materiales medianamente sueltos y constituido en su mayoría como un depósito que con el tiempo ha logrado cierto tipo de compactación. En este punto, garantizar que la erosión física y que los movimientos por debajo de la superficie no causen dificultades es indispensable para el proyecto. Se propone mediante dos diferentes sistemas de estabilización desarrollar la solución a las problemáticas planteadas y desarrolla la investigación preliminar adecuada.

Propuestas alternativas para la estabilización de taludes

El sistema de estabilización propuesto en el sector de las torres se compone de anclajes de 12 m de bulbo e inclinados 15° respecto a la horizontal. El diámetro de perforación será de 100 mm y 5 torones de 1/2 pulgada, sentido longitudinal y vertical deberán ir espaciados 2.75 y 3.0 m. En la figura 27 se presenta una vista frontal del anclaje diseñado para este caso.

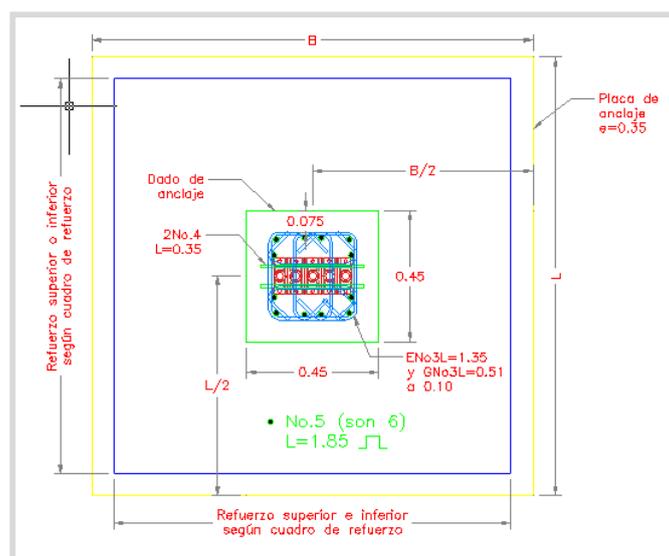


Figura 27. Vista frontal de la cabeza del anclaje, $L=1.5m$ y $B=1.5m$ (EVALTEC S.A, 2019).

Luego de realizar los cálculos de estabilidad incluyendo los anclajes con su respectiva configuración, y teniendo como guía la tabla 10 (Factores de seguridad), se observa que el sistema de retención mediante anclajes es adecuado para la estabilidad del sector y esto es constatado en las figuras 28, 29 y en la tabla 12, tomando una de las secciones más críticas.

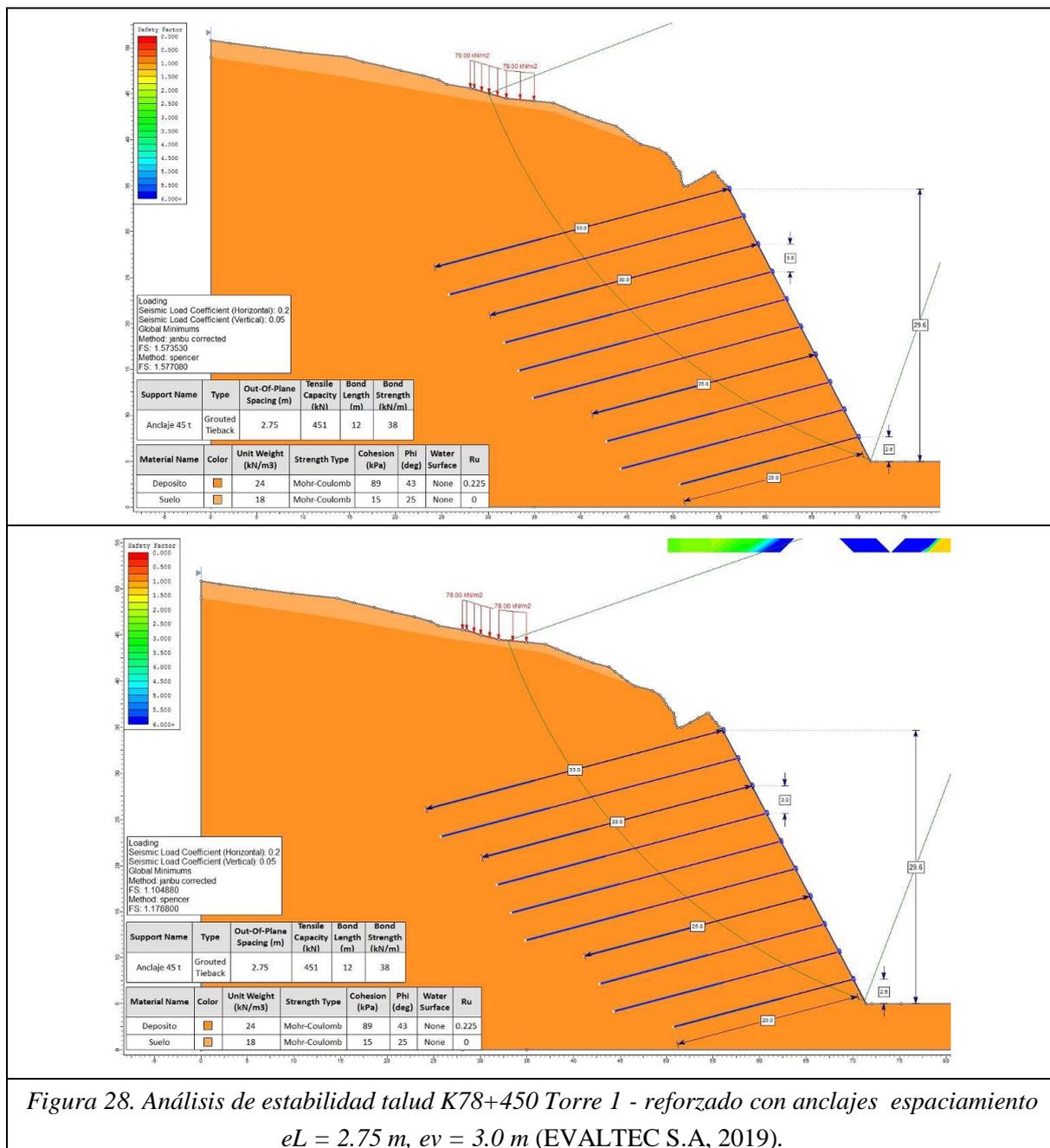


Figura 28. Análisis de estabilidad talud K78+450 Torre 1 - reforzado con anclajes espaciado $eL = 2.75\text{ m}$, $ev = 3.0\text{ m}$ (EVALTEC S.A, 2019).

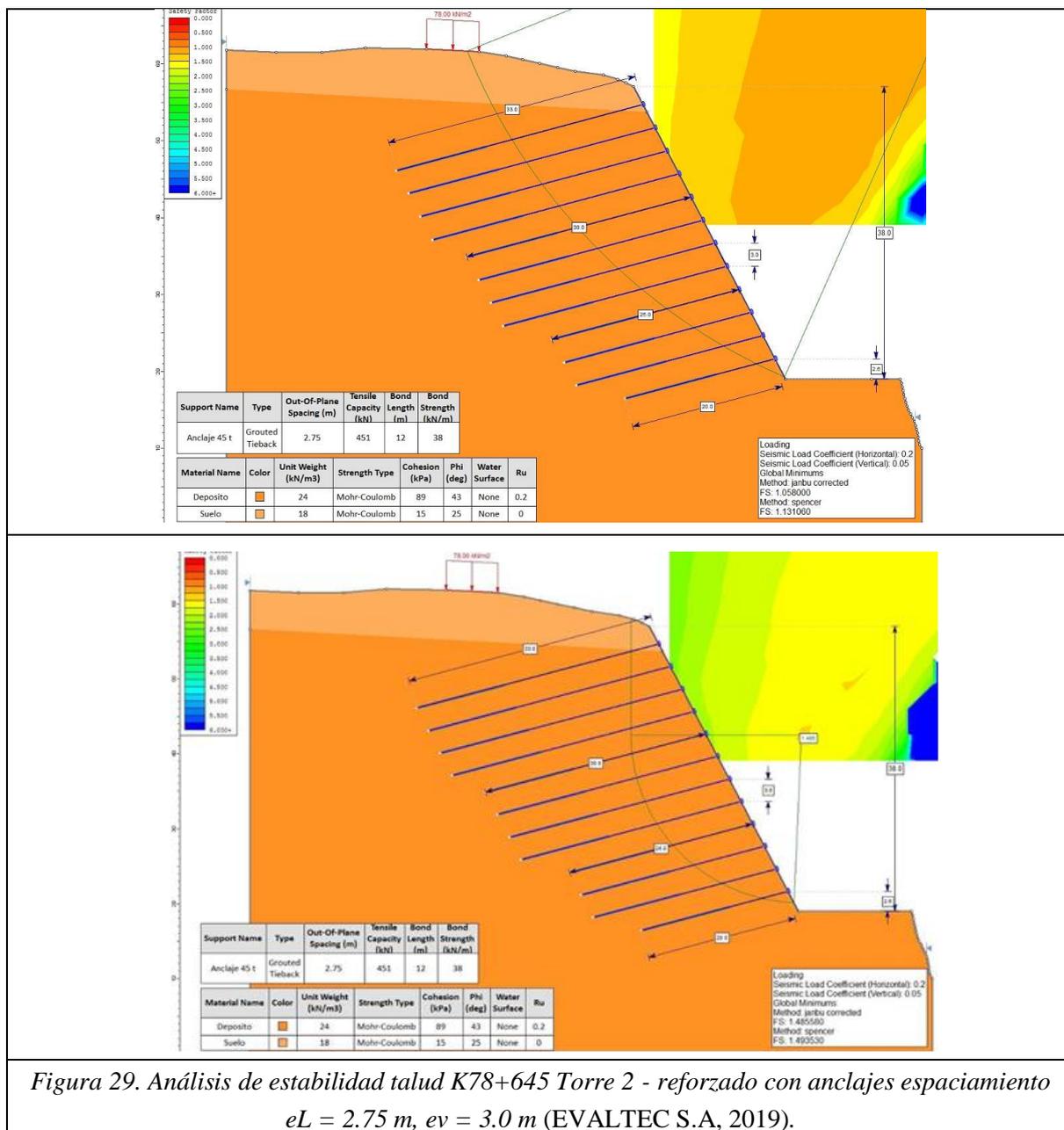


Tabla 12. Resultados de los análisis en los taludes con refuerzo (EVALTEC S.A, 2019).

Sección	Análisis	Altura/ Inc. Ladera	F.S. Janbu	F.S. Spencer
K78+450-T1	Condición estática, $R_u = 0.225$, $e_L = 2.75$ m, $e_v = 3.0$ m	29.5m/24°	1.573	1.577
	Condición dinámica $A_a = 0.20$ g, $R_u = 0.225$			
K78+645-T2	Condición estática, $R_u = 0.225$, $e_L = 2.75$ m, $e_v = 3.0$ m	38.0m/12°	1.485	1.493
	Condición dinámica $A_a = 0.20$ g, $R_u = 0.225$			

Al igual que en la modelación sin refuerzo, para calcular la estabilidad implementando los anclajes, se tomaron dos tipos de material caracterizados según la exploración de campo. De los resultados mostrados en la tabla 12 se puede concluir que para la torre 2 no se están cumpliendo con los factores de seguridad determinados por el proyecto (Caso estático 1.5 y caso dinámico 1.05), a pesar de esto se puede observar que es por un rango muy pequeño y es la empresa encargada del proyecto quien toma la decisión de construir aprobando dichos factores.

La estabilización mediante anclajes es la alternativa que presenta factores de seguridad más altos y confiables. Sin embargo, dada la solicitud de la interventoría por reducir costos, fue necesario sectorizar la zona, como se muestra en la tabla 13 y figura 30, y presentar dos alternativas importantes que también proporcionan estabilidad, seguridad y economía al proyecto.

Tabla 13. Delimitación de las zonas de refuerzo y separación de los anclajes (EVALTEC S.A, 2019).

Abscisa (i)	Abscisa (f)	Longitud	Separación Refuerzo	Taludes Existente			Observación
				Altura prom	Altura max	Altura min	
K78+392	K78+424.3	35.0		20.2	26.5	13.9	
K78+424.3	K78+474.3	50.0	$e_L = 2.75 / e_V = 3.0 \text{ m}$	30.0	34.3	24.5	Torre 1
K78+474.3	K78+555	80.0		35.2	38.6	28.1	
K78+555	K78+580	25.0		20.2	28.1	12.2	
K78+580	K78+619.5	40.0		30.4	37.1	23.9	
K78+619.5	K78+669.5	50.0	$e_L = 2.75 / e_V = 3.0 \text{ m}$	30.7	37.3	19.4	Torre 2
K78+669.5	K78+750	80.0		25.0	33.8	18.0	

Para realizar la reducción de costos es necesario sectorizar el lugar de trabajo, donde se dividen las dos alternativas a evaluar. La primera, consiste en establecer el planteamiento original de los anclajes en los sectores de uso obligatorio combinado con el sistema de cortes y terraceo.

La segunda, al igual que la primera utiliza el sistema original, pero se une con la implementación de un sistema de mallas flexible. La figura 26 expone una sectorización inicial donde se muestra dónde es obligatorio el uso de anclajes.

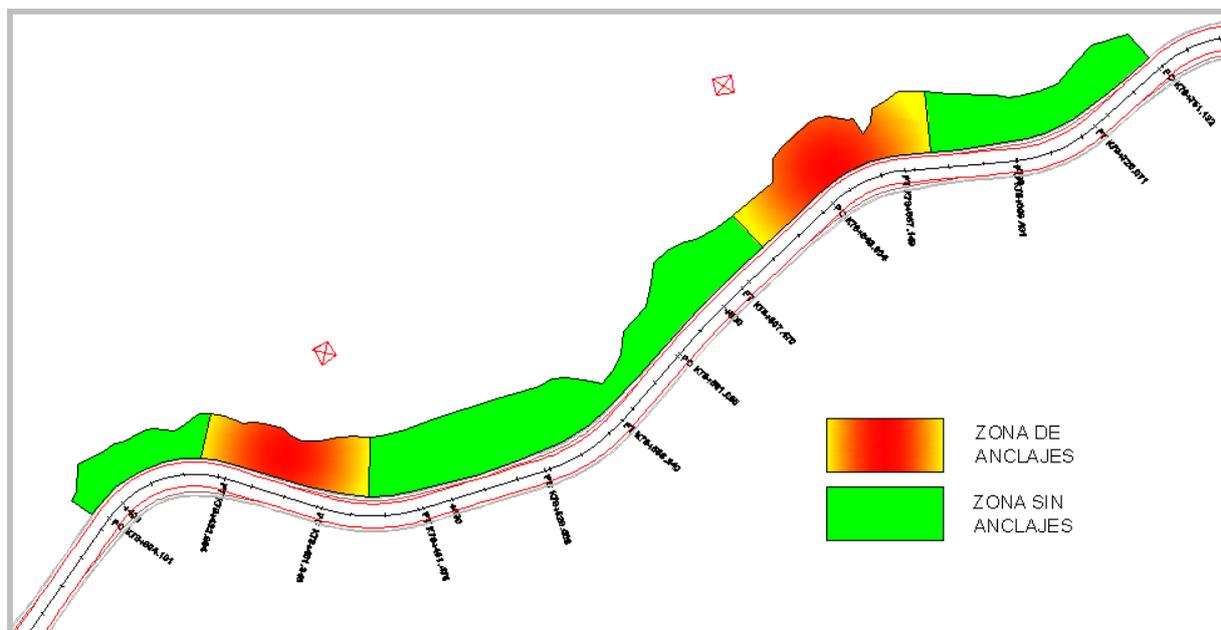


Figura 30. Sectorización de zonas con o sin refuerzo de anclajes del tramo K78+392 al K78+750 (Elaboración propia).

Cortes y terracedo

Se procedió a evaluar la estabilidad del talud en la zona sin anclajes mostrada en la figura 30, tomando en cuenta los cortes a efectuar con una inclinación 1 H: 2V hasta una altura de 20.0 m, se proyecta una berma intermedia de 3.0 m de ancho y se continúa el corte de la parte superior del talud con una inclinación de 3H: 4V (figuras 31 y 32); aquí se reducen los cortes y por ende se minimiza el transporte de material y el uso de maquinaria (Costo por hora).

Tabla 14. Resultados de los análisis en los taludes sin refuerzo (EVALTEC S.A, 2019).

Sección	Análisis	Altura/ Inc. Ladera	F.S. Janbu	gle/mor
K78+510	Condición estática, $R_u = 0.115$, Terraceo.	39.1m/12°	1.479	1.454

Sección	Análisis	Altura/ Inc. Ladera	F.S. Janbu	gle/mor
	Condición dinámica Aa = 0.20 g, Ru 0.115		1.072	1.093
K78+750	Condición estática, Ru = 0.115, Terraceo.	27.2m/30°	1.512	1.454
	Condición dinámica Aa = 0.20 g, Ru 0.115		1.088	1.100

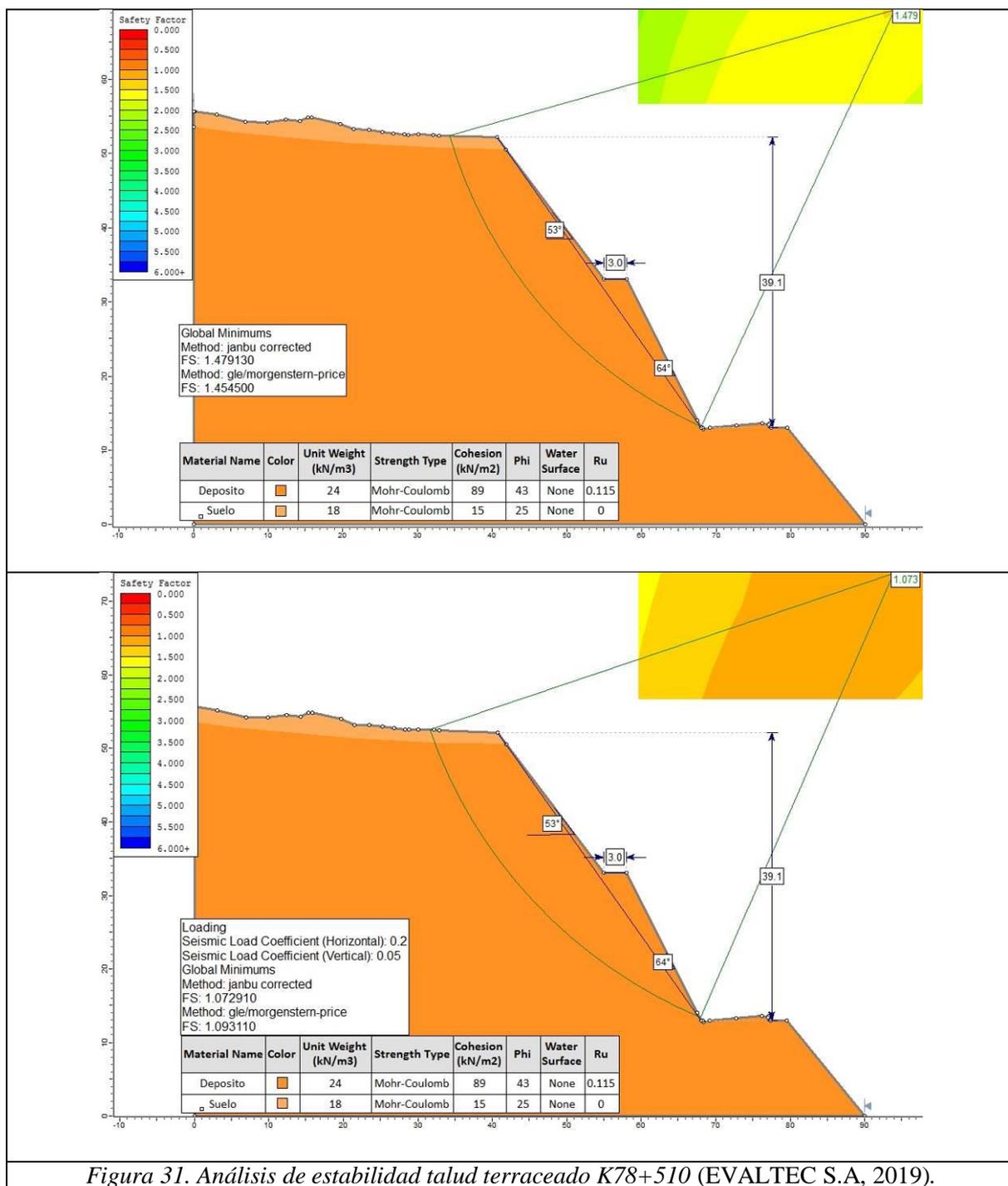


Figura 31. Análisis de estabilidad talud terracedo K78+510 (EVALTEC S.A, 2019).

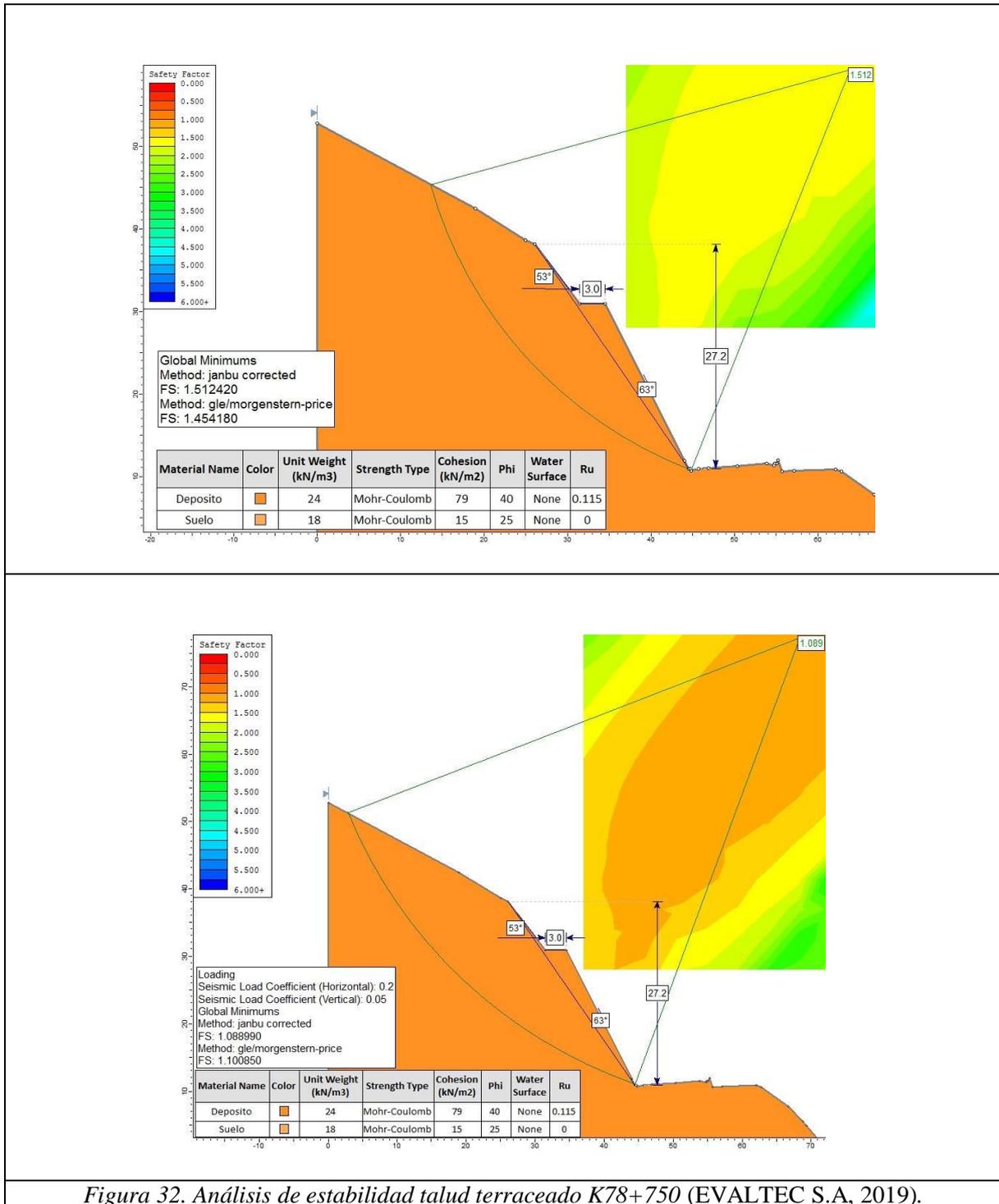


Figura 32. Análisis de estabilidad talud terracedo K78+750 (EVALTEC S.A, 2019).

De los análisis de estabilidad realizados se encontró que la estabilidad del depósito está influenciada por la aceleración de diseño adoptada, en general los factores de seguridad obtenidos no cumplen con los requerimientos mínimos para una aceleración de diseño de 0.20

g, pero del análisis con aceleraciones inferiores se encontró que para aceleraciones del orden de 0.15 g el factor de seguridad se incrementa en condición dinámica a valores superiores a 1.10. De nuevo se reitera que la decisión de construir con dichos factores de seguridad es responsabilidad de la empresa encargada, aunque dichos valores están muy próximos a los determinados por la norma de referencia.

Sistema de mallas flexibles

Las caídas de piedras y flujos de detritos pueden causar daños a personas y bienes, siendo estos fenómenos comunes en taludes conformados con bloques y matriz disgregable si no se garantiza la protección de la cara de los taludes.

Para proceder a realizar los análisis de esta alternativa, es importante realizar la verificación de la estabilidad superficial y paralela al talud, es por esto que en la figura 33, se muestra el equilibrio de fuerzas en la zona de influencia.

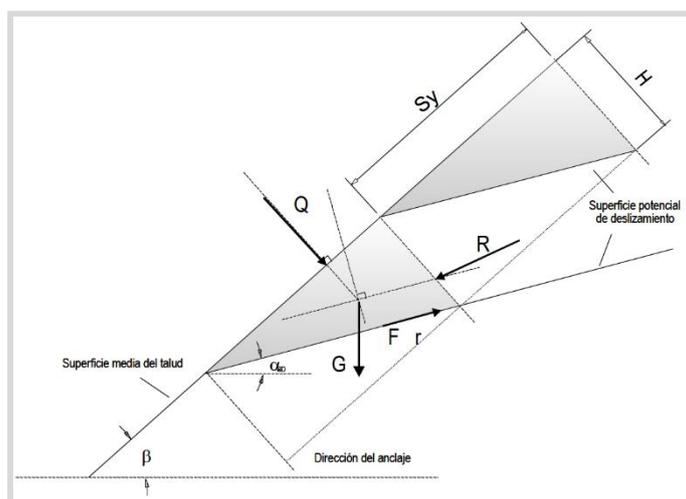


Figura 33. Esquema para la estabilidad superficial y paralela al talud (EVALTEC S.A, 2019).

La solución de la ecuación de equilibrio de la cuña n -ésima tiene la forma siguiente:

$$Q = f(S_x, S_y, \gamma, \alpha_{SD}, \beta, C, \phi, FS)$$

Donde:

- γ : Densidad del terreno de la zona inestable
 α_{SD} : Ángulo del plano de deslizamiento
 β : Inclinación de la cara del desmonte
 C : Cohesión del terreno
 ϕ : Ángulo de fricción interna
 FS : Factor de seguridad de los cálculos de estabilidad

Es indispensable en este punto del análisis conocer la descripción y los componentes de esta alternativa. En la tabla 15 se presenta la información correspondiente.

Tabla 15. Características técnicas de las mallas (EVALTEC S.A, 2019).

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Resistencias mecánicas	
Comportamiento	Isotrópico
Resistencia a tracción en eje vertical (Kg/m)	6
Resistencia a tracción en eje horizontal (Kg/m)	6
Resistencia a punzonamiento (kN)	45
Propiedades del alambre	
Díámetro nominal (mm)	3,2
Resistencia mínima a tracción (N/mm ²)	880
Protección anticorrosión	
Recubrimiento superficial (g/m ²)	150
Composición	90% Zn, 10% Al
Características del rollo	
Abertura nominal del cuadro (mm)	75
Formato del rollo	A pedido
Ancho del rollo (m)	1 a 5
Longitud del rollo (m)	5 a 175
Superficie (m ²)	5 a 875
Peso unitario (Kg/m ²)	1.8
Peso por rollo (Kg)	9 a 1.575
Bordes del rollo	-

El sistema contempla una separación vertical (S_y) y horizontal (S_x) de los pernos que es de 3.0m cada una (3.0 x 3.0m), exigida por el fabricante de la malla para garantizar la estabilidad de la cara del talud, y además, tienen un diámetro de 1" pulgada y 9 m de longitud para fijarse

al suelo debidamente como se puede ver en la figura 34. Por seguridad, el fabricante considera una presión de soporte máxima de 45 kN.

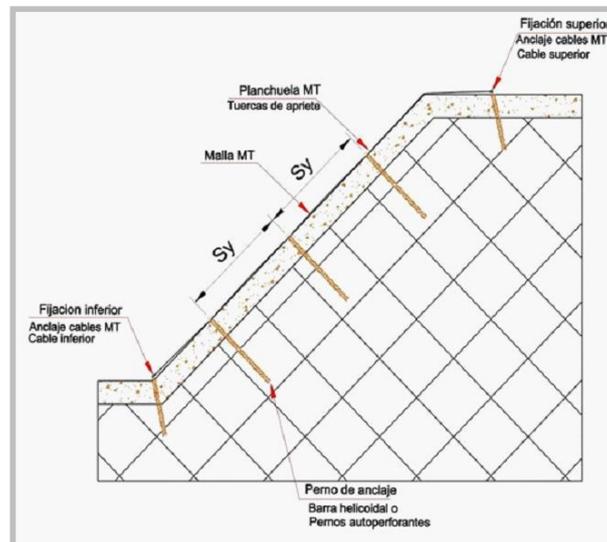


Figura 34. Vista lateral del sistema sostenimiento flexible (EVALTEC S.A, 2019).

Para los cálculos que son mostrados en la figura 35, los parámetros de resistencia definidos para el depósito (Tabla 9); como el ángulo de fricción, el peso unitario del suelo y el ángulo crítico que se evidenció en el estudio de cortes (Tabla 3), son de relevancia.

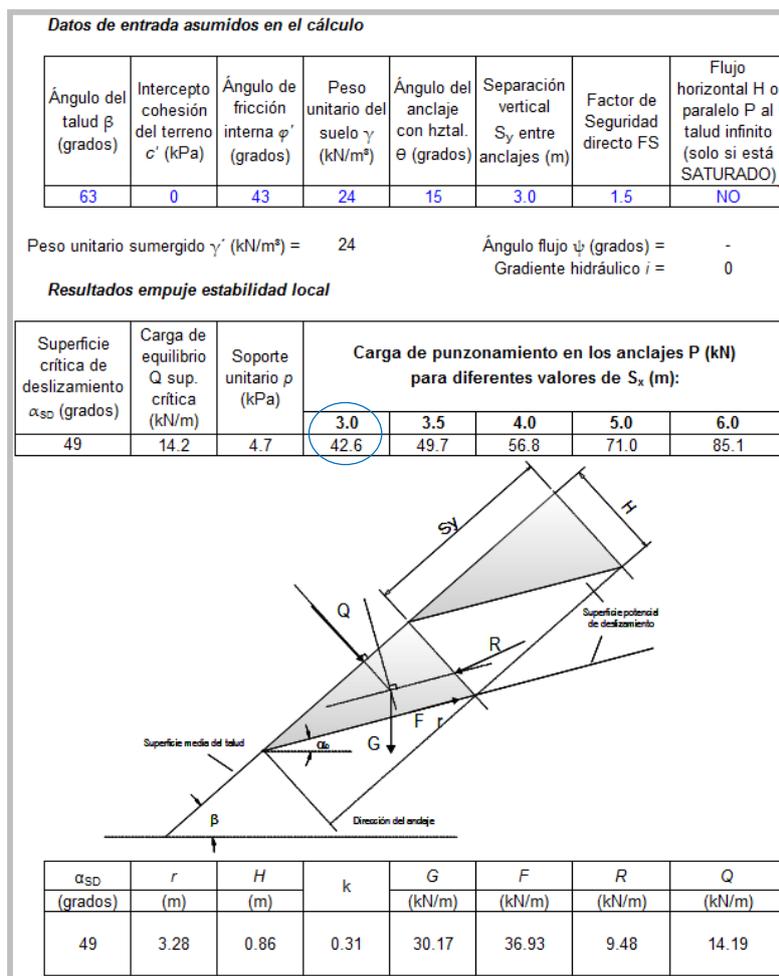


Figura 35. Análisis de la malla de retención en condiciones secas (EVALTEC S.A, 2019).

Por tratarse de materiales superficiales que están sin confinamiento y el requerimiento del desplazamiento de los materiales para que la malla trabaje, se analizó el sistema en una condición seca donde ocurre una mayor afectación por erosión del suelo. Aquí se evidencia, que la resistencia al punzonamiento recomendada por el fabricante de 45 kN cumple con los 42.6 kN calculados en condición crítica seca.

La metodología de cálculo está orientada a un macizo rocoso, con el fin de tener un estimativo de la malla requerida para contener un bloque con un volumen aproximado de 3.0 m³, lo cual es lo máximo esperado que pueda desprenderse de la formación.

Presupuesto de las alternativas

La alternativa que fue contemplada de manera inicial fue la de generar anclajes a lo largo de todo el sector de estudio, debido a la continua búsqueda de generar economía y garantizar los requerimientos de estabilidad, se implementan dos alternativas para desarrollar en la vía. La primera consiste en combinar parte de la alternativa original junto con el sistema de cortes-terraceo y la segunda intenta combinar el sistema original junto con un sistema de mallas flexible. A continuación, se presenta el presupuesto estimado para cada una de ellas.

Como se ha mencionado con anterioridad, la utilización de los anclajes representa la alternativa de mayor seguridad para la zona inestable, pero no ocurre lo mismo en cuanto a economía. En la tabla 16, se ha calculado el valor real de un anclaje de manera individual, de igual manera el valor unitario de cada material puede encontrarse en los anexos 1- 4 de este trabajo.

Tabla 16. Valor unitario del anclaje (Elaboración propia).

Ítem	Unidad	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
1. Materiales	m ³	Concreto 28MPa	1,01	579.228	582.645
	m ³	Concreto fluido Grouting 21MPa	0,13	408.622	51.486
	Kg	Acero 420MPa	62,92	3.408	214.407
	Kg	Acero 1900 Mpa	139,23	15.041	2.094.166
	Kg	Platina encapsulada	1,05	10.200	10.710
Subtotal materiales					2.953.414
2. Mano de obra	h	Oficial	0,70	70.000	49.000
	h	Ayudante	0,70	45.333	31.733
Subtotal mano de obra					80.733
3. Equipo	%	Herramienta menor	0,05	2.953.414	147.671
	h	Equipo de perforación	0,50	242.127	121.548
Subtotal equipo					269.218
4. Gastos	%	Imprevistos	0,07	3.303.366	231.236
Subtotal gastos					231.236
Costos directos (1+2+3+4)					3.534.602

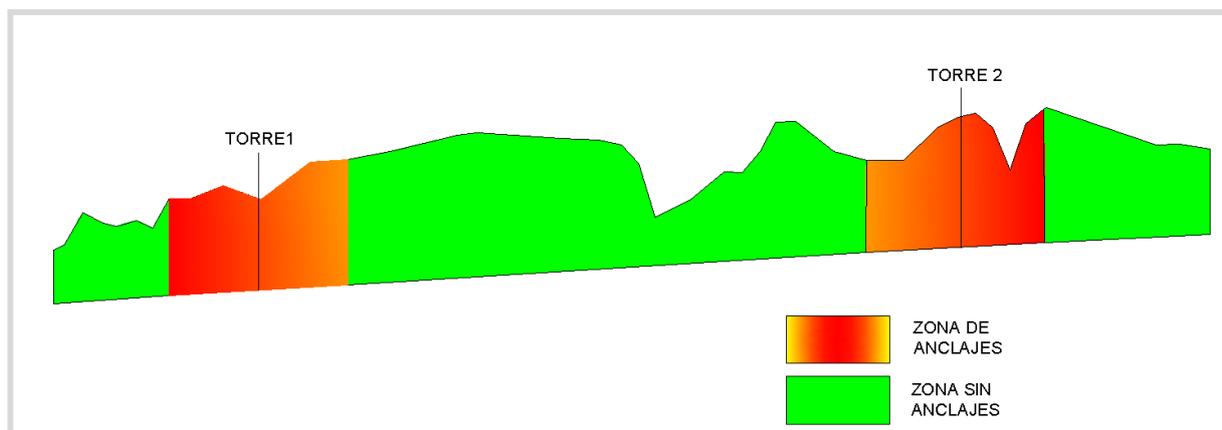


Figura 36. Vista frontal de la sectorización del proyecto del tramo K78+392 al K78+750 (Elaboración propia).

En consecuencia con el alto costo de la inversión de los anclajes, se ha propuesto sectorizar el lugar como es representado en la figura 36 y utilizar dicho sistema solo donde sea obligatorio (adyacente a las torres), como se muestra en la figura 37. Dicha sectorización, presenta un balance positivo en materia de economía como se muestra en la tabla 17.

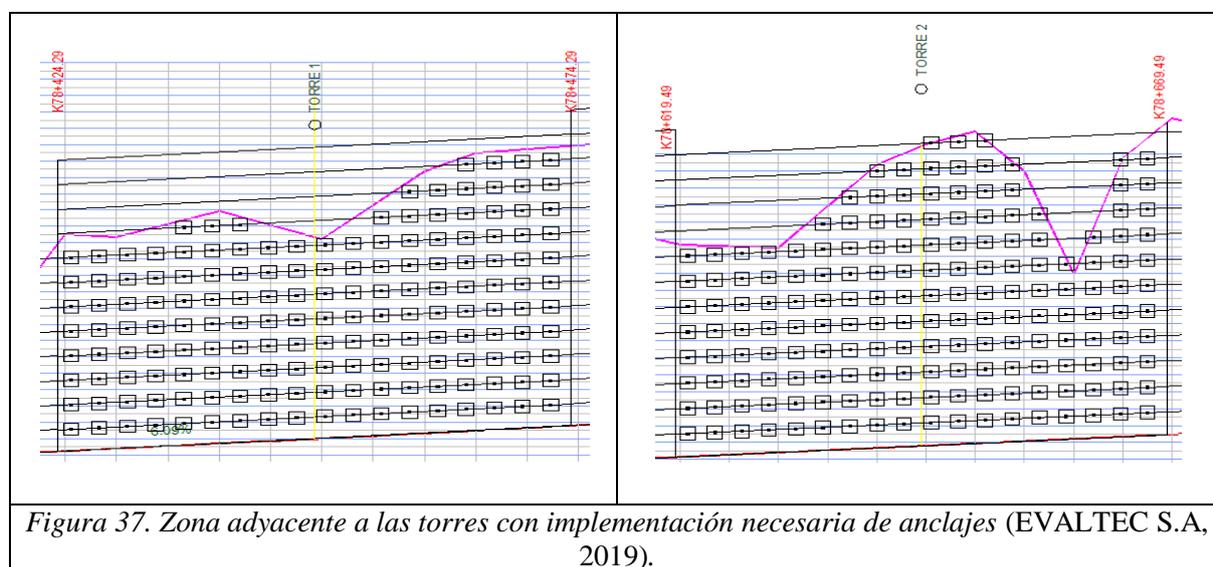


Figura 37. Zona adyacente a las torres con implementación necesaria de anclajes (EVALTEC S.A., 2019).

Tabla 17. Balance preliminar con la sectorización del proyecto (Elaboración propia).

Situación	No. Anclajes	Valor Total
Completo	739	\$2.612.070.816
Zonas Ady.	377	\$1.332.544.922
Solo Torres	362	\$1.279.525.894

Una de las alternativas de mayor economía está basada en el movimiento de tierras, lo cual ha sido la filosofía inicial del proyecto, dado que se está trabajando con poco espacio entre el borde de carretera y el río Atrato. Como el área de trabajo es un sector montañoso y con altibajos en su topografía, es importante delimitar los sectores más representativos como se observa en la figura 38 y de allí estimar la cantidad aproximada de cortes que se van a efectuar a lo largo de la zona.



Figura 38. Vista frontal de la sectorización para el cálculo de movimiento de tierra de los cortes (Elaboración propia).

Tabla 18. Delimitación y medidas de las zonas de cortes (Elaboración propia).

Abscisa inicial	Abscisa final	Longitud (m)
K78+392	K78+424	35,00
K78+474	K78+555	80,00
K78+555	K78+580	25,00
K78+580	K78+619	40,00
K78+669	K78+750	80,00

En la tabla 18, se presentan los cálculos de áreas promedio para los cortes según la sectorización de la figura 38. No obstante, es necesario calcular de manera transversal la profundidad de excavación como se muestra en la figura 39, para conocer el movimiento total de tierra.



Figura 39. Sección transversal crítica de la vía en el tramo K78+392 al K78+424 (Elaboración propia).

La figura 39, muestra la sección transversal más crítica del primer sector adyacente a las torres (K78+392 al K78+424), el área total calculada en esta sección es de 61.73 m^2 , utilizando el programa AutoCAD (Señalando el área a cortar por la retro excavadora lo cual es entre la línea verde - terreno natural y la línea roja - chaflán), y tiene una longitud de desarrollo a través de la vía de 35 metros, con esto es posible calcular el volumen aproximado que se tendrá que remover en dicho sector, como se muestra en la ecuación 1.

$$\text{Volumen}(\text{m}^3) = \text{Área} (\text{m}^2) * \text{Longitud} (\text{m}) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Volumen} = 61.73\text{m}^2 * 35\text{m}$$

$$\text{Volumen} = 61.73\text{m}^2 * 35\text{m}$$

$$\text{Volumen} = 2160.55\text{m}^3$$

De la misma forma se plantean los sitios críticos en los demás tramos mostrados en la tabla 18 y estos podrán ser encontrados desde la figura 40 a la 43.



Figura 40. Sección transversal crítica de la vía en el tramo K78+474 al K78+555 (Elaboración propia).



Figura 41. Sección transversal crítica de la vía en el tramo K78+555 al K78+580 (Elaboración propia).

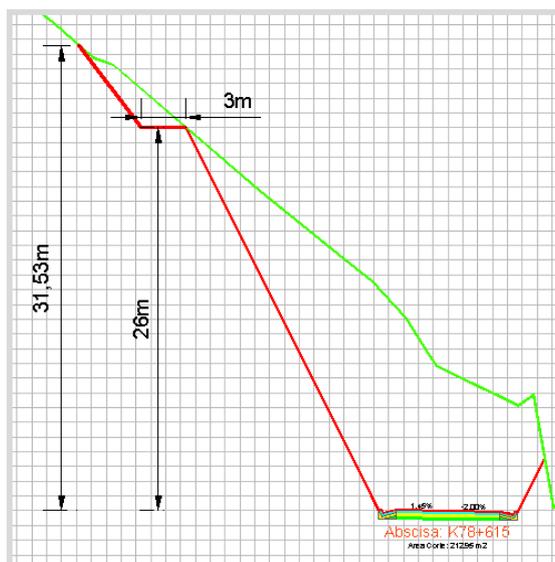


Figura 42. Sección transversal crítica de la vía en el tramo K78+580 al K78+619 (Elaboración propia).

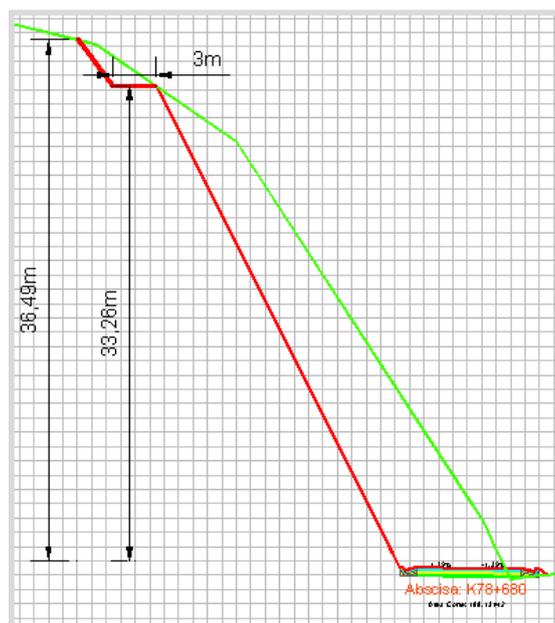


Figura 43. Sección transversal crítica de la vía en el tramo K78+669 al K78+750 (Elaboración propia).

En las tablas 19 y 20 se puede constatar el volumen y el valor total para los cortes de los sectores sin anclajes.

Tabla 19. Volúmenes totales para los cortes establecidos (Elaboración propia).

Abscisa inicial	Abscisa final	Longitud (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)
K78+392	K78+424	35,00	61,73	2160,55
K78+474	K78+555	80,00	110,32	8825,60
K78+555	K78+580	25,00	125,62	3140,50
K78+580	K78+619	40,00	212,95	8518,00
K78+669	K78+750	80,00	188,13	15050,40
Total				37695,05

Tabla 20. Valor por metro cúbico de las actividades para los cortes (Elaboración propia).

Ítem	Unidad	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
1. Mano de obra	h	Conductor	0,09	51.000	4.590
	h	Ayudante	0,09	45.333	4.080
Subtotal mano de obra					8.670
2. Equipo	%	Herramienta menor	0,05	8.670	434
	viaje	Volqueta 6 m ³	0,04	13.781	551
	h	Retroexcavadora sobre llantas, motor 62HP, Profundidad de excavación de 5.41 metros.	0,04	110.000	4.400
Subtotal equipo					5.385
3. Gastos	%	Imprevistos	0,05	14.055	703
Subtotal gastos					703
Costos directos (1+2+3)					14.757

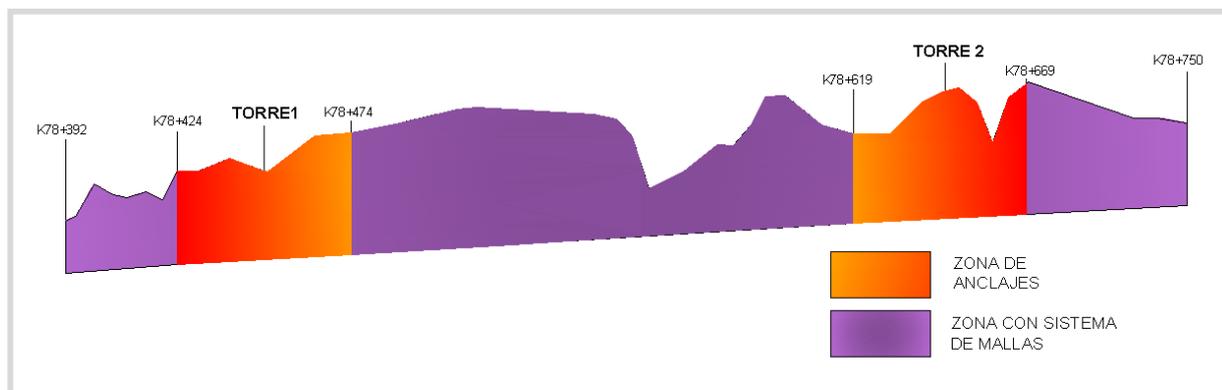
Adicionalmente, se ha logrado establecer un balance parcial de los trabajos con esta alternativa mostrada en la tabla 21, y se ha contemplado la posibilidad de combinar estos trabajos con trabajos de revegetalización.

Tabla 21. Valor parcial de la alternativa de cortes y terracedos (Elaboración propia).

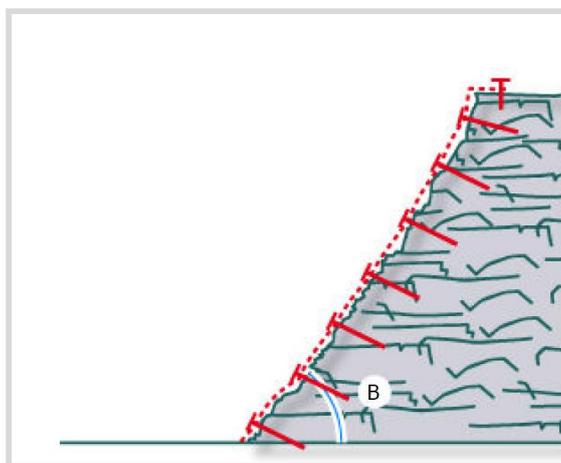
Valor de Cortes y terracedo	
Valor metro cúbico	14.757
Total de metros cúbicos(m ³)	37695,05
Costo total	556.283.041,79

El sistema de estabilización mediante mallas, logra además de contener el material que pueda ser erosionado a lo largo del terreno, facilitar la posibilidad de que ocurra una revegetalización en el sitio. Se ha determinado de igual manera, algunas secciones para las zonas de intervención

como lo muestra la figura 44. El tratamiento en este caso ocurre de manera superficial y garantizando en gran medida la estabilidad y la disminución de algún percance.



En la figura 45, se muestra el perfil del sostenimiento mediante pernos junto con el sistema de mallas, los cuales proveen la estabilidad general a lo largo del terreno y su debido espaciamiento permiten el crecimiento continuo y natural de plantas, sin embargo, no debe permitirse el crecimiento de árboles ya que sus raíces pueden causar movimientos que no son adecuados para el terreno.



Luego de presentar la sectorización del lugar para la opción de mallas flexibles, se puede notar que han salido tres zonas importantes para cubrirlas con dicho sistema, es por esto que se ha tomado cada área aferente vista de manera frontal según se puede ver en la figura 44 y se han calculado gracias al programa AutoCAD, esto se puede ver expresado en la tabla 22. Adicionalmente, en la tabla 23 se pudo constatar el valor de lo que costaría un metro cuadrado de todo el sistema según lo planteado en los cálculos.

Tabla 22. Delimitaciones y áreas totales para el sistema de mallas establecido (Elaboración propia).

Abscisa inicial	Abscisa final	Longitud (m)	Área (m ²)
K78+392	K78+424	35,00	930,26
K78+474	K78+619	145,00	6460,65
K78+669	K78+750	80,00	1887,08
Total			9277,99

En este punto, el cálculo del área lo da directamente el programa utilizado, y lo que se busca es conocer la cantidad de metros cuadrados que se van a cubrir de manera superficial.

Tabla 23. Valor por metro cuadrado para el sistema de mallas (Elaboración propia).

Ítem	Unidad	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
1. Materiales	Un.	Malla flexible según especificaciones	0,33	56.700	18.900
	Un.	Pernos	0,33	18.900	6.300
	Un.	Platina	0,33	10.200	3.400
Subtotal materiales					28.600
2. Mano de obra	h	Oficial	0,10	70.000	7.000
	h	Ayudante	0,09	45.333	4.080
Subtotal mano de obra					11.080
3. Equipo	%	Herramienta menor	0,05	28.600	1.430
	h	Equipo de perforación	0,05	242.127	12.106
Subtotal equipo					13.536
4. Gastos	%	Imprevistos	0,05	53.216	2.661
Subtotal gastos					2.661
Costos directos (1+2+3+4)					55.877

Una vez se ha desarrollado el valor unitario por metro cuadrado, se obtiene el balance parcial de lo que costaría la alternativa de sistema de mallas flexible, constatado en la tabla 24.

Tabla 24. Valor parcial de la alternativa de sistema de mallas flexibles (Elaboración propia).

Valor de Sistema de mallas	
Valor metro cuadrado	\$ 55.877
Área total (m ²)	9277,99
Costo total	\$ 518.427.801,29

En consecuencia, según los estudios evaluados y establecidos con criterios sustentables desde la ingeniería y las normativas técnicas colombianas, la tabla 25 muestra la disminución de costos que podría establecerse una vez se elija la alternativa que se ajuste mejor al presupuesto del contratista.

Tabla 25. Balance final de las alternativas propuestas (Elaboración propia).

ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN			COSTO INICIAL
SECTORIZACIÓN			
Descripción	CORTES	MALLAS	
Alternativa	\$ 556.283.042	\$ 518.427.801	\$ 2.612.070.816
Anclajes	\$ 1.279.525.894	\$ 1.279.525.894	
Total	\$ 1.835.808.935	\$ 1.797.953.695	
Economía	\$ 776.261.881	\$ 814.117.121	

El balance final se presenta como un valor estimativo para cada una de las propuestas generadas a partir de los estudios y modelaciones que se plantearon como medidas auxiliares. Se puede notar que las dos alternativas; tanto cortes como mallas; oscilan entre los 500 y 600 millones de pesos, siendo este un valor considerable para la economía de la obra. De antemano, se puede ver que el valor que tiene el sistema de anclajes es muy alto comparado con lo propuesto, incluso cuando se quitaron alrededor de 362 unidades para dar paso a las otras propuestas. En la tabla 25 se puede ver el valor total de las dos combinaciones que se plantearon como medidas

de optimización, la primera; realizando cortes y utilizando los anclajes en ciertos sectores y la segunda; implementando un sistema de mallas junto con la opción original de anclajes.

Finalmente, se puede determinar que el sistema que genera mayor economía son las mallas flexibles, llegando a ahorrar más de 800 millones de pesos. Sin embargo, es decisión del constructor determinar cuál alternativa se va a utilizar ya que ambas generan un amplio margen de ganancia. Además, en las dos opciones se debe tener en cuenta la capacidad del personal de trabajo, ya que ambas actividades son de gran complejidad, es decir, realizar la instalación del sistema de mallas debe de ser realizado por alguien que conozca de antemano dicho funcionamiento, de la misma manera la persona que maneje la maquinaria pesada en los cortes debe de conocer y satisfacer las necesidades de dicha actividad. Es necesario asegurar por parte de los encargados que ambos sistemas funcionen para garantizar la estabilidad de los taludes.

Conclusiones

- El tramo de estudio K78+392 a K78+750, junto con algunos sectores adyacentes presenta dificultades gracias al bajo grado de cementación y a la gran variedad de flujos de agua a lo largo del terreno de estudio. La mayoría de las amenazas tienen en cuenta las altas probabilidades de erosión del suelo y la proximidad de altas laderas con la vía y con el borde del río. Lo anterior, resume la necesidad de proceder con la intervención, en este caso con la metodología necesaria para alejar la banca del río y garantizar la seguridad del tránsito.
- Las normativas de referencia de la empresa a cargo de desarrollar el sistema eléctrico de la población cercana a las torres ubicadas en las abscisas K78+450 y K78+645, fueron determinantes para el desarrollo del informe, debido a que, en la mayoría de los cálculos, las restricciones geotécnicas establecidas con los manuales de diseño marcaron la manera de proceder con la modelación. Por lo anterior, se concluye que, aunque existen otras formas de proceder con medidas de contención, las normas utilizadas para este caso son adecuadas y satisfacen los lineamientos del sistema constructivo del país.
- Luego de realizar los recorridos a lo largo del sector de estudio, se comprueba la necesidad de modificar el trazado geométrico para mejorar las condiciones del tráfico pesado. De acuerdo a lo anterior, se concluye que las zonas más vulnerables a la pérdida de estabilidad están ubicadas a menos de 20 metros una de la otra, demostrando que es indispensable que el tratamiento geotécnico se haga en todo el corredor.

- Debido a la cantidad de movimientos de material y la poca estabilidad del lugar, las obras de mitigación como solución inicial desde la geotecnia no cumplen con los requerimientos necesarios para proteger el corredor vial ya que funcionan a muy corto plazo y sería una pérdida económica para los encargados, es por esto que se plantean alternativas geotécnicas sustentables en el tiempo y que a la vez ayuden a controlar dichas situaciones.

- Las alternativas planteadas son las siguientes:

1. Eliminar del diseño 362 anclajes y en lugar de esto, sectorizar el tramo para realizar cortes y terraceos donde no sea posible utilizar los anclajes restantes debido a diferentes restricciones.
2. Luego de hacer la sectorización pertinente de forma similar que la primera alternativa, no hacer uso de los mismos 362 anclajes y ubicar un sistema de mallas flexibles que soporten adecuadamente los detritos y otros materiales que generen inestabilidad.

- Partiendo de las alternativas planteadas, se ha logrado llevar a cabo un balance preliminar en la economía debido a la eliminación de 362 anclajes y ha quedado registrado, que los costos se han reducido un 48.9%. Una vez evaluada desde la economía, la alternativa de los cortes y terraceados, la tabla 25 permite constatar que, el valor de la inversión se ha reducido un 24% respecto a lo que se pagaría por el proceso de estabilización inicial. De la misma manera, se concluye una reducción de 31.2% para el valor específico dada las alternativas del sistema de mallas flexibles.

- Los estudios se han planteado desde diferentes posibilidades de trabajo, no obstante, dado que el terreno no está en el nivel de cementación adecuado que da el paso de los años, la alternativa

de los cortes y su disminución de la inclinación, ofrece una mejor solución a las amenazas revisadas y detalladas con anterioridad.

- Este trabajo, propone alternativas que contemplen desde su diseño, economía y seguridad. Existen otras posibilidades de estabilización como los son los muros de contención adyacentes a la cuneta de la vía u barreras de protección contra desprendimientos.

- Los sistemas de estabilización propuestos cumplen con la mayoría de ítems para ser alternativas de solución para disminuir el costo de estabilización de los taludes en el tramo K78+392 a K78+750 de la vía Transversal Quibdó-Medellín. Sin embargo, se pudo notar en las diferentes modelaciones que algunos factores de seguridad no cumplen con lo mínimo establecido por la norma de referencia, pero por pequeños valores, es por esto que se deja a consideración del encargado del proyecto la viabilidad constructiva de las alternativas.

Referencias Bibliográficas

- EVALTEC S.A. (2019). *Informe del Volumen V estabilidad y estabilización de taludes, sector 3 K78+830 al K78+158*. Medellín.
- Gonzalez, Á. (1999). *Estimativos de Parámetros Efectivos de Resistencia con el SPT*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Google Maps. (2019). *Google Maps*. Obtenido de <http://www.google.com/maps>
- IDEAM-UDCA. (2015). *Estudio Nacional de la Dregaración de los Suelos por Erosión en Colombia*.
- IGAC. (14 de Febrero de 2019). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Obtenido de <http://www.igac.gov.co/es/que-hacemos>
- INGEOMINAS. (2005). *Autodiagnóstico Minero del Cauca Indígena CRIC*. Cauca: Ministerio de Minas y Energía.
- INGEOMINAS. (2008). *Geología de la plancha 165. Carmen de Atrato*. Colombia: Ministerio de Minas y Energía.
- INVIAS. (1998). *Manual de Estabilidad de Taludes*. Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte.
- INVIAS. (2013). *Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras*. Ministerio de Transporte.
- NSR. (2010). *Normas Colombianas de diseño y construcción Sismo Resistente, NSR-10*. Bogotá: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA.
- Piera, J. V. (1876). *La creación: Historia natural, escrita por una sociedad de naturalistas*. Montaner y Simon.
- Suarez, J. (1996). Capítulo 4: Análisis de estabilidad. En J. suarez, *Deslizamientos: Análisis geotécnico*.
- Suárez, J. (1996). *Estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Santander: Universidad Industrial de Santander.
- Tierra y Tecnología. (17 de Octubre de 2016). *Tierra y Tecnología*. Obtenido de <https://www.icog.es/TyT/index.php/2016/10/slide-la-mejor-aplicacion-estabilidad-taludes/>
- USACE. (2003). *Manual Técnico del US Corps Army of Engineers*. Estados Unidos.
- Vallejo, L. G. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación.

Weller, J. (1960). *Stratigraphic principles and practice*. Nueva York: Harper and Brothers.

Yepes, V. (2016). *Procedimiento de construcción de cimentaciones y estructuras de contención*. Valencia: Universitat Politecnica de Valencia.

Anexos

Anexo 1. Valor del concreto de 28 MPa por metro cúbico (Elaboración propia).

Ítem	Unidad	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
1. Materiales	m ³	Agua	0,26	2.918	760
	m ³	Arena	0,73	100.000	73.080
	m ³	Agregado grueso T. Máx 12,5mm	0,73	70.000	51.156
	Kg	Cemento gris en sacos	474,16	440	208.632
Subtotal materiales					333.628
2. Mano de obra	h	Oficial	0,39	70.000	27.440
	h	Ayudante	0,47	45.333	21.352
	h	Peón	1,17	45.333	53.040
	h	Ayudante entendido	1,23	55.000	67.650
Subtotal mano de obra					169.482
3. Equipo	h	Concreteira	0,63	34.088	21.544
	%	Herramienta menor	0,05	333.628	16.681
Subtotal equipo					38.225
4. Gastos	%	Imprevistos	0,07	541.334	37.893
Subtotal gastos					37.893
Costos directos (1+2+3+4)					579.228

Anexo 2. Valor del grouting de 21 MPa por metro cúbico (Elaboración propia).

Ítem	Unidad	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
1. Materiales	m ³	Agua	0,21	3.000	630
	m ³	Arena lavada	0,83	100.000	82.950
	Kg	Cal	10,50	700	7.350
	Kg	Cemento gris en sacos	474,16	440	208.632
Subtotal materiales					299.562
2. Mano de obra	h	Oficial	0,35	70.000	24.500
	h	Ayudante	0,47	45.333	21.307

Ítem	Unidad	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
Subtotal mano de obra					45.807
3. Equipo	h	Concretetera	0,63	34.088	21.544
	%	Herramienta menor	0,05	299.562	14.978
Subtotal equipo					36.522
4. Gastos	h	Imprevistos	0,07	381.890	26.732
Subtotal equipo					26.732
Costos directos (1+2+3+4)					408.622

Anexo3. Valor del acero de 420 MPa por kilogramo (Elaboración propia).

Ítem	Unidad	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
1. Materiales	Kg	Acero de barras corrugadas Fy:4200Kg/cm ²	1,07	\$ 2.300	\$ 2.463
	Kg	Alambre galvanizado para atar de 1,3mm D.	0,01	\$ 2.000	\$ 23
Subtotal materiales					\$ 2.486
2. Mano de obra	h	Oficial	0,01	\$ 70.000	\$ 350
	h	Ayudante	0,01	\$ 45.333	\$ 408
Subtotal mano de obra					\$ 758
3. Equipo	%	Herramienta menor	0,05	\$ 2.486	\$ 124
Subtotal equipo					\$ 124
4. Gastos	h	Imprevistos	0,07	555	39
Subtotal equipo					39
Costos directos (1+2+3+4)					\$ 3.408

Anexo4. Valor de los torones de 1900 MPa por kilogramo (Elaboración propia).

Ítem	Unidad	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
1. Materiales	Kg	Torón de 1/2"	1,05	\$ 12.450	\$ 13.073
	Kg	Alambre galvanizado para atar de 2,77mm D.	0,01	\$ 4.400	\$ 51
Subtotal materiales					\$ 13.123
2. Mano de obra	h	Oficial	0,01	\$ 70.000	\$ 630
	h	Ayudante	0,01	\$ 45.333	\$ 544
Subtotal mano de obra					\$ 1.174
3. Equipo	%	Herramienta menor	0,05	\$ 13.123	\$ 656

Ítem	Unidad	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
Subtotal equipo					\$ 656
4. Gastos	h	Imprevistos	0,07	1.251	88
Subtotal equipo					88
Costos directos (1+2+3+4)					\$ 15.041