

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Escuela de Ingeniería en Construcción**

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón-La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

María Catarina Chacón Quesada

Cartago, Julio 2018.

**Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.**



# Abstract

The intention of this project is to evaluate the areas that are more vulnerable of the highway: route 35, in the stretch of Sifón-La Abundancia, and the planning of corrective and actions. With what are determined areas with presence of landslides, vulnerable areas and areas that have been intervened for the functionality of the road. It is proposed a monitoring system that contemplates the conditions of the site and at the same time allows improvement actions.

As part of the evaluation we will identify the location, study and classification of the location that present some type of risk on the road. The corrective actions and monitoring allows to define in a conceptual manner the improvements to be made in sectors with greater vulnerability and technical solutions to critical sectors, in the same way to define the type and location of the monitoring for these sectors. In addition, different important factors are considered, such as geology, geometry and the present problems, in order to define the corrective actions and provide protection to monitoring instruments.

As much as the evaluation and the planning apply criteria and recommendations that are already established, were considered modifications or improvements products of the experience of Asesorías GEOTEC S.A in previous projects. However, it should be revised and/or modified once the analyzes of the efforts and deformations of the slopes7critical sectors that did not have analyzes at the time developing this project.

**Keywords:** *Landslides, instrumentation, Slopes – Geology.*

# Resumen

Se pretende evaluar los sectores vulnerables de la carretera: ruta 35, en el tramo Sifón-La abundancia, y además del planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo. Se determinan las zonas con presencia de deslizamientos, las zonas vulnerables y las zonas que han sido intervenidas para la funcionalidad de la carretera. Se plantea un sistema de monitoreo que contemple las condiciones propias del sitio y al mismo tiempo permita definir acciones de mejora.

Como parte de la evaluación se realiza la identificación, ubicación, estudio y clasificación de los sectores que presentan algún tipo de riesgo en la ruta. El planeamiento de las acciones correctivas y de monitoreo pretenden definir de manera conceptual las mejoras a realizar en los sectores con mayor vulnerabilidad y soluciones técnicas a los sectores críticos, de igual forma definir el tipo y la ubicación de la instrumentación de monitoreo para estos sectores. Además, se contemplan diferentes factores importantes como la geología, geometría y problemática presente en los taludes, para definir las acciones correctivas y brindar protección a los instrumentos de monitoreo.

Tanto la evaluación y el planeamiento aplica criterios y recomendaciones ya establecidas, se consideraron modificaciones o mejoras producto de la experiencia de Asesorías GEOTEC S.A., en proyectos anteriores. Sin embargo, se debe revisar y/o modificar una vez que se cuenta con los análisis de los esfuerzos y deformaciones de los taludes/sectores críticos que no contaban con los análisis al momento de desarrollar este proyecto.

**Palabra Clave:** *Deslizamientos, instrumentación, taludes, geología.*



# **Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.**

MARÍA CATARINA CHACÓN QUESADA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio del 2018

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN



# Contenido

Prefacio.....	1
Resumen ejecutivo .....	2
Marco Teórico.....	3
Introducción .....	25
Metodología .....	27
Resultados.....	31
Análisis de los resultados .....	100
Conclusiones .....	107
Recomendaciones .....	109
Apéndices .....	110
Anexos .....	204
Referencias.....	206



# Prefacio

Es importante determinar los sectores que representan un riesgo en la construcción y la funcionalidad de la carretera nacional: ruta 35, así como predecir y dar soluciones correctivas a las zonas vulnerables debido a las condiciones bajo las cuales están sometidas y a los deslizamientos presentes que afectan la vía y ponen en peligro la seguridad de los usuarios.

Actualmente, la carretera presenta serios problemas de inestabilidad, muchos de ellos asociados con deslizamientos antiguos, problemas por escombreras y fallas geológicas que en su mayoría no presentan actividad.

Considerando la importancia de la obra, la complejidad geológica y geotécnica de la zona, con este trabajo se desea planear una propuesta de acciones correctivas, preventivas y de monitoreo en los sitios vulnerables, de manera que al implementarlas se pueda evitar o minimizar la afectación de la vía.

De tal manera se obtiene una guía de soluciones a manera de recomendación para los sectores vulnerables identificados, que promueva la estabilización de las zonas por medio de acciones correctivas concretas. Y permita conocer las especificaciones necesarias de instrumentación para el monitoreo de las zonas una vez intervenidas o en riesgo de deslizarse.

## Agradecimientos

A mi madre Damaris Quesada por su ejemplo de valentía, esfuerzo y dedicación, por ser un pilar fundamental en mi vida brindándome su amor y apoyo incondicional.

A mi padre Luis Chacón y hermanos por estar siempre presentes.

A mi profesora guía Ivannia Solano y a los ingenieros Francisco Rojas y Yeison Méndez, por su orientación y enseñanzas durante la realización del proyecto.

Al Tecnológico de Costa Rica y sus profesores por darme las herramientas necesarias a lo largo de la carrera para desarrollarme como profesional.

A la empresa Asesorías Geotec S.A. por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto y a todos aquellos profesionales de la empresa que en algún momento me ayudaron.

# Resumen ejecutivo

Con la construcción de diferentes obras de infraestructura vial de gran importancia en diversas zonas del país y en general para toda la población, la necesidad de que estas sean funcionales, de calidad y seguridad para los usuarios se vuelve indispensable.

La implementación de sistemas de monitoreo y acciones correctivas, que permitan tener un control de estas obras y de los factores que pueden tener una afectación en las mismas es de gran importancia para lograr el objetivo.

Es por esta razón que surge el estudio de los sectores críticos en la carretera nacional, ruta 35 para poseer la información necesaria para la implementación de este sistema de control. Para la evaluación de los sectores vulnerables y elaborar la guía de acciones correctivas e instrumentación de monitoreo específica, junto con una base de datos que permite tener acceso de manera fácil y rápida a la información relevante de los sectores estudiados para evitar mayor afectación en la carretera fue necesario el siguiente procedimiento:

- Identificar y ubicar:

Se realizaron visitas al sitio para identificar y ubicar las zonas vulnerables, zonas deslizadas y zonas intervenidas. Se determina la ubicación por medio de GPS y sistemas de ubicación digital. Por medio de un mapa geográfico, se ubican los puntos identificados a los cuales se les asignaron las características, propiedades y problemáticas más relevantes por medio de la elaboración de Cuadros.

- Caracterizar y clasificar:

Se realizó una caracterización general para todos los sitios identificados, esto con el objetivo de identificar las características generales de la zona, como vegetación, condición de humedad, relieve, presencia de humedales, fallas, entre otros. De manera específica se realizó una

caracterización de las 13 zonas identificadas previamente por la empresa, los cuales presentan mayor vulnerabilidad o riesgo de deslizamiento, fueron caracterizados y posteriormente clasificadas según el tipo de deslizamiento, el grado de vulnerabilidad y el daño de afectación en la vía.

La caracterización se llevó a cabo al observar alguna evolución con el tiempo y según criterios específicos como: materiales, altura de corte, factores antrópicos, afectación, evolución temporal de la problemática. De manera que para la clasificación se preparó un documento llamado "Matriz de Inestabilidad" donde se indica el grado de vulnerabilidad de la carretera por cada zona estudiada, para clasificar la zona como de alto riesgo o no.

- Análisis Geotécnico:

Se realizó un análisis de manera que se estudia la problemática, condiciones y geometría de las zonas. Se eligen dos de los sectores críticos para realizar un análisis más profundo y así brindar soluciones técnicas a estas zonas que requieren una intervención más pronta. Por medio de software Slide y Phase 2 de Rocscience®, se realiza un análisis de estado limite, así como un análisis de elemento finito en cuanto a deformaciones, asentamientos y esfuerzos, tomando como referencia lo establecido en el Código de Taludes de Costa Rica y Código de Cimentaciones de Costa Rica.

- Planeamiento:

Se plantearon las acciones correctivas y de monitoreo para evitar o minimizar afectaciones en la vía. Se investigan las acciones correctivas que se pueden implementar en carreteras. Luego de esto se asignó a cada uno de los sectores críticos, una posible acción correctiva (como mínimo), tomando en cuenta la metodología, utilización y función de la solución a implementar.

Al proponer instrumentación de monitoreo para prevenir afectaciones en la vía, se investigaron los equipos de instrumentación utilizados para monitorear problemas geotécnicos en carreteras. Y se definió el tipo y la ubicación de los equipos de instrumentación que se requieren para monitorear las zonas críticas.

# Marco Teórico

## Generalidades del proyecto de infraestructura vial: carretera, ruta 35

La carretera ruta 35, carretera Naranjo-Florencia, es un proyecto de infraestructura vial específicamente, una carretera de montaña de aproximadamente 36 km de longitud, que se caracteriza por cruzar el área limítrofe entre las cordilleras volcánicas neógenas y el espacio más distal occidental de la Cordillera Volcánica Central.

Su alineamiento pasa por numerosos valles, ríos, y zonas de altas pendientes; condiciones que propician la generación de los fenómenos de movimientos de masas son abundantes, frecuentes y de muy diferentes escalas.

### Antecedentes

Esta es la nueva carretera a San Carlos, que conecta a Naranjo, con Florencia. Permite comunicar a los productores de la Zona Norte con la Meseta Central.

El proyecto originalmente estaba pensado a dos carriles, sin embargo, pero tomando en cuenta las condiciones del tráfico vehicular se aprobó una adenda para ampliarlo a cuatro carriles.

Al ampliarse el tamaño y la calidad del proyecto, a solicitud de las comunidades y sectores productivos para mejorar esta vía, el costo creció a 20.600 millones de colones, siempre cumpliendo con todas las normas legales y controles administrativos del país.

### Características del proyecto

La carretera se desarrolla en tres tramos, como se explica a continuación:

**Punta Norte:** Es un tramo que mide 5,6 kilómetros, conecta La Abundancia con Florencia y además cuenta con una radial que dirige hacia Ciudad Quesada.

**Tramo Central:** Une Sifón con La Abundancia, es el tramo más largo con 29,7 kilómetros y es el que presenta en la actualidad mayor grado de avance.

**Punta Sur:** El tramo mide 7,0 kilómetros, comunica Naranjo-Sifón.



Figura 1. Carretera Nacional: Ruta 35 Fuente: Ministerio de Obras Públicas y transportes (MOPT), 2016.

## Beneficios del proyecto

Uno de los principales intereses de la finalización de esta carretera es el beneficio económico que todo el país recibirá, esta es una ruta clave para el transporte de productos de consumo nacional y productos de exportación, esta carretera comunica dos zonas de alto impacto en el comercio.

Al reducir la distancia de las zonas, con un diseño de carretera de cuatro carriles, con una velocidad de diseño de 80 km/h y con fáciles accesos, el transporte evidentemente se agiliza.

Esta carretera también representa una herramienta de turismo que lo impulsa, al comunicar zonas de gran demanda turística con la GAM, como lo son las zonas de San Carlos, con principal interés la fortuna entre otras que poseen grandes atractivos turísticos, como: aguas termales, cataratas, ríos y el Volcán Arenal.

Claramente, resulta como una gran visión por parte del Gobierno de Costa Rica reactivar la construcción de esta vía en medio de una crisis de infraestructura vial.

## Problemática en la zona

Actualmente, la zona se ve afectada por diferentes problemáticas, y más intensamente por las condiciones de la geología que promueve la inestabilidad de los taludes de corte, relacionando esto a los tipos de suelo de baja calidad en su mayoría porosos, que promueven deslizamientos y afectaciones en la vía.

La carretera se encuentra en una zona con una serie de fallas geológicas, que atraviesan gran porcentaje de la zona en construcción de la nueva carretera, por lo que es común observar afectaciones en la vía por movimientos de masas propiciadas en estos alineamientos de fallas.

Se presenta también sobre el trazado de la carretera evidencias morfológicas asociadas a deslizamientos antiguos, la formación de lagunas, algunas muy cerca de la carretera, la formación de estas lagunas o el origen se ha dado principalmente por los mismos deslizamientos y acumulación de agua drenada en la zona. Aun así, algunas de estas lagunas son profundas y dan un gran paisaje a la zona, que afecta el avance de la construcción por los estudios correspondientes.

De igual forma se han dado deslizamientos por la socavación por parte de riachuelos, que pasan por la zona, donde la dirección del flujo contribuye al fenómeno mencionado.



Figura 2. Grietas en vía. Fuente: Visita sitio 17 de enero, 2018.

## Estado Actual del proyecto

La construcción de la carretera actualmente se encuentra detenida, por falta de recursos para finalizar la obra, de igual forma por la inexistencia de un planteamiento completo para definir el alcance en cuanto a presupuesto y período de finalización de los tramos.

Por lo que se está a la espera de la resolución de la Contraloría General de la Republica, y las acciones del CONAVI.

La carretera cuenta con una serie de problemas geológicos-geotécnicos asociados con deslizamientos antiguos, problemas por escombreras, fallas geológicas que en su mayoría no presentan actividad y condiciones poco favorables de la zona. La mayoría de los problemas no se han solucionado, aun existiendo una serie de propuestas para los sitios más críticos, estas soluciones no han sido construidas debido a la espera de la aprobación presupuestaria.

# Geología Regional

La zona donde se ubica el proyecto en construcción, carretera nacional ruta 35, posee condiciones geológicas complejas, esto debido a la presencia de estructuras de fallas y pliegues producto de la composición tectónica regional, aparte de la presencia de depósitos volcánicos recientes que cubren gran parte de la zona.

Según el actual Código de Cimentaciones de Costa Rica, en la zona del proyecto, se registran suelos residuales rojizos susceptibles a inestabilidad de taludes, en condiciones húmedas con frecuencias superiores al 100%, suelos residuales de origen volcánico por lo general del tipo MH y ML, (limos de alta y baja plasticidad), en zonas húmedas con frecuencias superiores al 100%

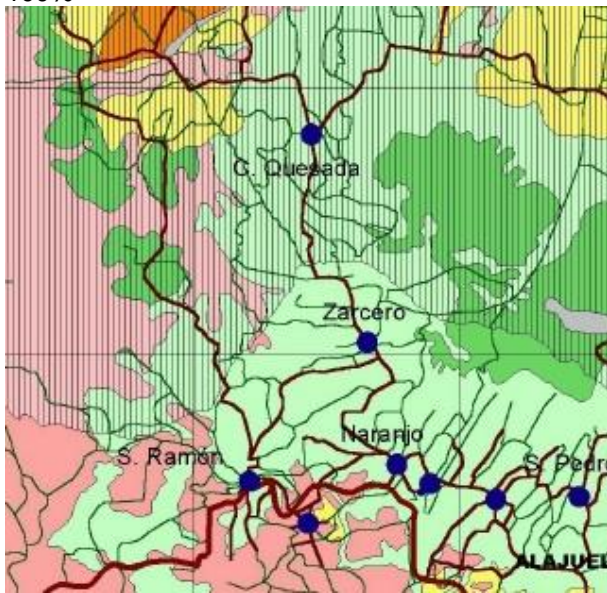


Figura 3. Geología de Zona. Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica 2008.

De acuerdo con la geología de la zona, según Atlas 2014, existen materiales volcánicos como lavas, tobas y piro-clastos. Litología volcánica sin identificar, lavas basálticas a andesíticas y brechas. En el mapa a continuación se muestran dichas unidades presentes en la zona respectiva al proyecto de la construcción de la nueva carretera.

Estos materiales en su mayoría son formaciones de origen volcánico debido a la ubicación cercana a las cordilleras volcánicas.<sup>1</sup>

**Lavas:** Se refiere a masas fundidas de magma emitidas por un volcán, la cual tiene un rango amplio de composiciones, las propiedades físicas dependen de la composición, contenido de volátiles, cristales o por la historia de enfriamiento.

Los materiales se clasifican según la morfología que presentan, que de igual forma dependen de la composición y viscosidad.

**La Toba:** es un tipo de roca ígnea, de origen volcánico, se llama ceniza, al material no consolidado; después de su consolidación se denomina toba, se limita a fragmentos de roca en donde predominan los fragmentos de menos de 2 cm de diámetro. Se le llama aglomerado para rocas en las que predominan fragmentos mayores de 2 cm de diámetro. Las tobas depositadas en un medio acuoso (tobitas) muestran excelente estratificación, y hay muchas formas.

**Los Piroclastos:** están constituidas por material volcánico fragmentado que por explosión ha sido lanzado a la atmósfera, y se producen en volcanes de lava viscosa. Las rocas piroclásticas son de diferentes tipos, pero pueden distinguirse dos grupos principales: material que, habiendo sido lanzado fuera del volcán, ha solidificado en el aire, depositándose en forma de partículas sólidas. Material que ya ha salido del volcán en forma sólida, pero que se ha roto a consecuencia de la actividad explosiva.

**Las Brechas:** son rocas compuestas de clastos angulares o fragmentos, en las brechas monomíticas, los clastos tienen la misma composición, mientras que las brechas polimíticas contienen clastos de composición diferente. Las brechas sedimentarias comprenden más del 30% de clastos angulares de tamaño de grava, mayor de 2 mm producidos por la meteorización o deformación de las rocas cercanas. Las brechas sedimentarias se desarrollan en la base de taludes o cerca de fallas activas.

<sup>1</sup> Denyer, P & Kussmaul, S. 2000. Geología de Costa Rica . 515 págs. Cartago, Editorial Tecnológica.

Las brechas son similares al conglomerado, una de las principales diferencias es que en la brecha los fragmentos no han sido redondeados por la acción del agua en movimiento, como lo es en el conglomerado.

La composición de una brecha puede estar influenciada por el clima, por lo que puede variar debido a esto. Puede poseer diferentes colores, ser una roca colorida ya que el color de la matriz junto con el de los fragmentos permite que se dé de esta manera.

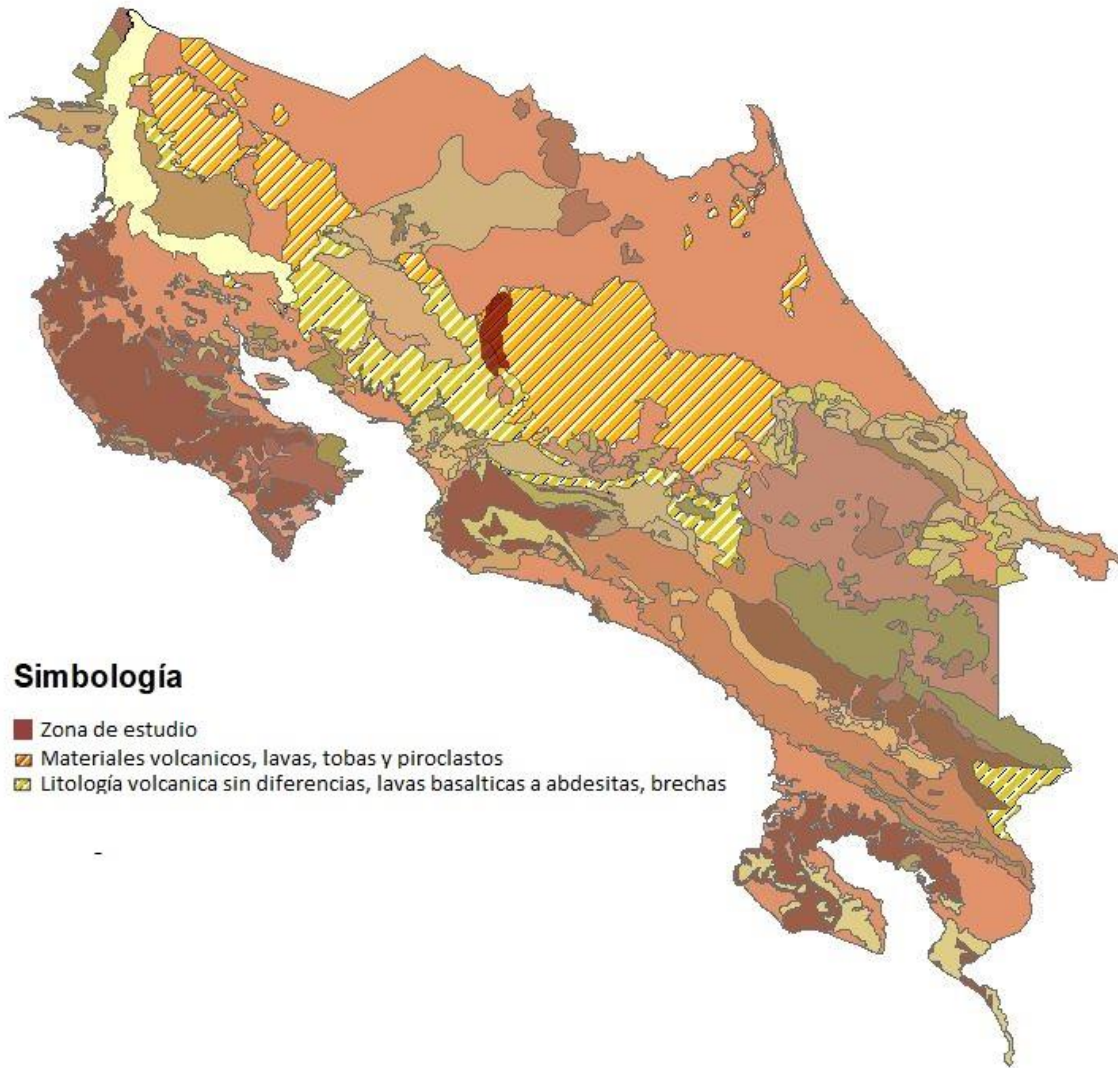


Figura 4. Geología de la zona. Fuente: Elaboración propia ArcGIS.

# Aspectos generales de un deslizamiento

Se le conoce deslizamiento a el movimiento descendente de roca o suelo, que ocurre en la superficie de ruptura, ya sea curva o plana, cuando se da un deslizamiento gran parte de la masa se mueve muchas veces actuando como una masa cohesionada o semi-cohesionada, o con poca deformación interna.

Las partes de un deslizamiento se muestran en la figura 5 mostrada a continuación.

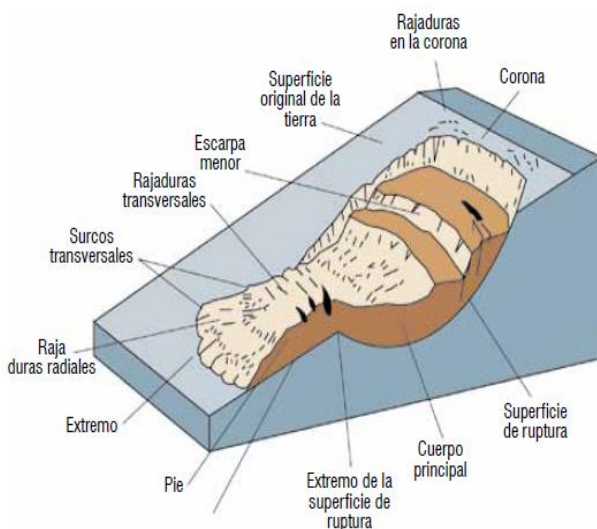


Figura 5. Características básicas de un deslizamiento. Fuente: Manual de Derrumbes, 2008.

Donde es importante explicar y conocer cada una de las partes de un deslizamiento, esto para identificarlos de mejor forma cuando se realiza inspección o reconocimiento en campo.

**Corona:** es el material prácticamente no desplazado adyacente a las partes más altas del escarpe principal.

**Escarpe principal:** Es la superficie escarpada en el terreno no perturbado en el borde superior del deslizamiento de tierra causado por el movimiento de material desplazado lejos del suelo no perturbado, es parte visible de la superficie de la ruptura.

**Cabeza:** Partes superiores del deslizamiento de tierra a lo largo del contacto entre el material desplazado y la escarpa principal.

**Pie:** Porción de deslizamiento de tierra que se ha movido más allá de la punta de la superficie de ruptura y se superpone a la superficie original del terreno.

**Extremo o punta:** margen inferior, generalmente curvado, del material desplazado de un deslizamiento de tierra, más alejado de la escarpa principal

**Superficie de ruptura:** superficie que forma el límite inferior del material desplazado por debajo de la superficie del suelo original, la idealización mecánica de la superficie de ruptura se denomina superficie de deslizamiento.

**Extremo o punta de la superficie de ruptura:** intersección entre la parte inferior de la superficie de ruptura de un deslizamiento de tierra y la superficie original del terreno.

**Cuerpo principal:** Parte del material desplazado del deslizamiento que se superpone a la superficie de ruptura entre el escarpe principal y la punta de la ruptura de la superficie.

**Zona de agotamiento:** área de deslizamiento dentro de la cual el material desplazado se encuentra debajo de la superficie del suelo original.

**Zona de acumulación:** área de deslizamiento dentro del cual el material desplazado se encuentra por encima de la superficie de la tierra original.

# Derrumbes y su clasificación

## Caídas

### Desprendimiento de roca

Desprendimientos bruscos de roca o tierra, laderas empinadas (verticales) o acantilados, masa puede romperse con el impacto, comunes en playas rocosas de ríos. El volumen del material varía de rocas centimétricas hasta grandes bloques métricos. Las causas son socavamiento por procesos naturales como arroyos y ríos. Intemperización. Actividades humanas excavación/construcción.



Figura 6. Desprendimiento de Roca. Fuente: Manual de Derrumbes 2008.

### Derribo o Volcamiento

Es la rotación hacia delante de una masa de suelo o roca. Se desprende de la ladera a partir de un eje o punto por debajo de este. Frecuentes en tierras volcánicas y a lo largo de los cauces de ríos o laderas empinadas. El material desplazado generalmente son rocas, escombros como material grueso y tierra como material fino. Las causas son: gravedad ejercida por el peso del material que se encuentra pendiente arriba del material desplazado, por agua en las grietas de la masa.

# Deslizamientos

## Deslizamiento rotacional

Superficie de rotura se curva hacia arriba y el movimiento es más o menos de rotación. Masa puede moverse como material cohesivo con poca deformación interna. Los materiales desplazados pueden moverse verticalmente hacia abajo y la superficie superior se inclina hacia atrás. Son muy comunes en materiales de relleno. Pendientes que varían entre los 20 y 40 grados. La relación entre profundidad y altura es de 0,3 a 0,1. Saturación de laderas y aumento de niveles de agua subterráneos.



Figura 7. Deslizamiento rotacional Fuente: Manual de Derrumbes, 2008.

## Deslizamiento traslacional

La masa se mueve hacia afuera, o hacia abajo y hacia afuera, y el material avanza distancias considerables. El deslizamiento traslacional es menos profundo que los deslizamientos de rotación.

Los deslizamientos traslacionales son causados en su mayoría por un aumento de agua subterránea, fugas en los tubos, por procesos de meteorización y erosión que promueven a su vez el socavamiento de la zona y de igual forma por actividades humanas, que generan cambios tanto en la morfología como en la hidrología del terreno.



Figura 8. Deslizamiento Traslacional Fuente: Manual de Derrumbes, 2008.

## Extensión

### Extensión Lateral

Pendientes suaves o terrenos generalmente planos, cuando una capa superior fuerte se mueve de una capa inferior más débil. El área afectada puede ser de tamaño pequeño y tener algunas grietas. Es causado por licuefacción en la capa débil, sobrecarga natural sobre una ladera inestable, saturación de la capa subyacente, deformación plástica del material inestable.



Figura 9. Extensión Lateral. Fuente: Manual de Derrumbes, 2008.

## Corrientes

### Corriente de escombros

Movimiento rápido de masa que forma una pasta y fluye hacia abajo, los materiales desplazados son: tierra suelta, roca, material orgánico, agua. El material puede ser delgado y aguado, con sedimentos y escombros. Se presenta por flujos intenso de agua superficial, fuertes lluvias, erosión del suelo.

### Corriente escombros volcánicos

Corrientes de lodo volcánico que se genera alrededor de los volcanes, los materiales desplazados son: tefra suelta, son aquellos materiales expulsados por el volcán que quedan en el aire y se acumulan. Las causas son por agua, por acumulación en lagos volcánicos y condensación del vapor.

### Avalancha de escombros

Las avalanchas de escombros son corrientes grandes con pendiente abierta que se forman cuando se derrumba un talud inestable. Los materiales desplazados son: escombros, material de laderas, material volcánico. Ocurren cuando hay actividad volcánica.

### Corrientes de tierra

Suaves pendientes moderadas, se mueve como una corriente plástica o viscosa con deformaciones internas. Los materiales desplazados son suelos finos, barro o limos, lecho rocoso de barro fértil muy degradado.

Deslizamientos de cientos a miles de kilómetros. Se dan principalmente por la saturación del suelo debido a lluvias u otros factores, reducción repentina de agua en superficies adyacentes a erosión.

### Corrientes de arrastre

Corriente de tierra lenta, movimiento descendente lento y constante debido a la pendiente. Es un movimiento general de tierra, es causado por

cambios estacionales, humedad y temperatura. Esfuerzo cortante superan la resistencia del material, con pendientes que alcanzan el punto de falla, con fugas de tubería y drenajes.

# Causas de los deslizamientos

Los factores que promueven el movimiento de masas son aquellos capaces de generar cambios en las fuerzas internas y externas que actúen sobre el terreno.

Existen factores condicionantes que dependen de la naturaleza y la forma del terreno, así como factores desencadenantes, que son factores externos que causan la inestabilidad.

## Factores Condicionantes

### Relieve

Ya que es necesario una pendiente para que se produzca movimientos gravitacionales. Los relieves montañosos son los más propensos a movimientos de laderas.

### Estructura geológica

Determina el potencial al movimiento dependiendo del tipo de material presente en la zona, ya sean materiales rocosos o suelos. La presencia de planos de discontinuidad que actúan como superficies de rotura.

### Comportamiento hidrogeológico

Es importante la condición bajo la que se encuentran los materiales dependiendo del clima, ya que estos materiales se ven alterados, los niveles freáticos elevados influyen significativamente en la estabilidad.

El agua produce efectos negativos sobre los materiales, como la reducción de la resistencia al corte por la generación de presiones intersticiales y por la reducción de los parámetros de resistencia.

También aumenta los esfuerzos al cortante por el aumento del peso en el terreno.

## Propiedades geo-mecánicas

Estas propiedades controlan la resistencia al corte de los materiales y la rotura, por lo tanto, serán estas propiedades las que determinen el comportamiento tanto de los suelos, como de los macizos rocosos.

## Deforestación

Es el proceso progresivo de la reducción de la masa forestal, bosques y demás. La deforestación promueve el desbalance de estado hídrico en el terreno, así como los procesos de erosión.

## Meteorización

La meteorización es la descomposición de las rocas ubicadas en la superficie de la Tierra, por medio de diferentes agentes como lo son: agua, viento y cambios extremos de temperatura y la actividad biológica.

## Factores Desencadenantes

### Precipitaciones y condiciones climáticas

Principalmente, relacionados al volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones. La presencia de agua en el terreno da lugar a presiones que alteran los estados tensionales, el peso, la erosión tanto interna como externa, cambios en los minerales y todos estos factores afectan la resistencia del suelo.

Las grandes cantidades de precipitaciones pueden promover los movimientos superficiales, la rápida infiltración del agua en el terreno, hace que este se sature, que aumenten las presiones y se dé el movimiento.

Los períodos lluviosos prolongados pueden aumentar la inestabilidad en zonas susceptibles, permite la reactivación de antiguos deslizamientos.

## Cambios del nivel de agua

El aumento del nivel de agua por la presencia de lluvias o por otros factores como el llenado de lagos u otros, provoca un aumento de las presiones intersticiales que pueden desencadenar o acelerar los deslizamientos.

También el descenso brusco del nivel de agua son condiciones de desequilibrio por permanecer los materiales con elevadas presiones que no se disipan inmediatamente.

## Procesos erosivos

El proceso de erosión puede ser fluvial o litoral, provoca una disminución en la resistencia del material y cambios en el estado tensional, es por esto y por falta de apoyo del material que se genera inestabilidad y generación de deslizamientos.

## Terremotos

Los terremotos provocan diversos tipos de movimientos en los terrenos, dependiendo de los materiales, la magnitud y distancia del epicentro se pueden generar deslizamientos.

De igual forma los terremotos promueven el fenómeno de licuefacción en suelos finos y sueltos, afectando deslizamientos antiguos y promoviendo nuevos desplazamientos de masas.

## Vulcanismo

Las erupciones volcánicas pueden provocar generalmente deslizamientos o avalanchas rocosas, derrumbes de gran magnitud y velocidad.

Dependiendo de los materiales, el contenido de humedad y la pendiente, los materiales pueden fluir alcanzando una gran distancia.

## Acciones antrópicas

Dentro de todos los factores, la actividad humana representa uno de los factores más importantes, ya que actividades como las excavaciones, la construcción de presas, embalses, la sobrecarga por la construcción de diferentes estructuras, los

cortes y rellenos y la utilización de voladuras, modifican los estados tensionales y las propiedades geotécnicas de manera que se genera inestabilidad.

A continuación en el Cuadro 1, se muestra una Cuadro resumen de los factores explicados anteriormente, con la influencia y efectos de estos en el comportamiento del terreno, que promueven la inestabilidad y el deslizamiento en la zona.

Cuadro 1. Factores influyentes en la inestabilidad de ladeas y taludes.

Influencia de diferentes factores en las condiciones de los materiales y laderas		
Factores		Influencias y Efectos
<b>Condicionantes</b>	Relieve (pendientes, geometría)	Distribución del peso del terreno
	Litología (composición y textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico.
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisótropo. Zonas de debilidad.
	Propiedades geo-mecánicas del material	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones intersticiales.
	Deforestación	Modificaciones en el balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad
<b>Desencadenantes</b>	Precipitaciones y aportes de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno. Saturación en suelo. Erosión.
	Cambio en las condiciones hidrológicas	
	Aplicación de cargas estáticas o dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. Incremento de presiones intersticiales.
	Cambios morfológicos y geometría de laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado tensional.
	Erosión y socavación del pie	Cambios geométricos en la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

Fuente: Ingeniería Geológica. Luis I Gonzales de Vallejo.

# Análisis de estabilidad de Taludes o Laderas

Como parte fundamental en el diseño y la construcción de obras de infraestructura vial como carreteras de montaña, se encuentra el análisis frecuente de las condiciones de las laderas y taludes ubicadas por donde pasa la obra.

Los suelos, al igual que otros materiales, fallan en algún momento cuando son cargados con incrementos de esfuerzos normales. La resistencia al corte es fundamentalmente el resultado de las fuerzas de fricción que se ejerce entre las partículas, es una de las propiedades más importantes del suelo ya que de ella depende la estabilidad de los taludes, entre otras.

Por esto es necesario realizar los análisis correspondientes por métodos determinísticos, para definir la condición de estabilidad y las obras de intervención que pueden incluir obras de estabilización y drenaje. Se hace necesario establecer el alcance de la solución, en función de la magnitud del problema analizado.

Se puede realizar mediante una metodología de análisis de equilibrio límite, en este caso los análisis de estabilidad se realizaron con la ayuda del programa de computo Slide v6.023, programa de la empresa Rocscience®.

La metodología de análisis: equilibrio límite en dos dimensiones, asume que el factor de seguridad es el mismo a lo largo de toda la superficie de deslizamiento. Si se obtiene un valor del factor de seguridad (FS) superior a 1,0 indica que la capacidad de resistencia al corte excede la demanda y que el talud es estable con respecto a la superficie de falla analizada. Por el contrario, un valor de factor de seguridad menor a 1,0 indica que el talud es inestable y que va a fallar.

El factor de seguridad se expresa de la siguiente forma:

$$FS = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

Donde, las fuerzas estabilizadoras son:

- La resistencia al esfuerzo cortante que posee el terreno, debido a la cohesión y la fricción interno a lo largo de la superficie de rotura.
- La componente del peso que actúa normal a la superficie de rotura.
- Fuerzas exteriores a favor de la estabilidad.

Y las fuerzas desestabilizadoras son:

- La componente del peso que actúa en la dirección del plano de rotura.
- La resultante de las presiones intersticiales o del agua, que actúan en la superficie de rotura.
- Cargas estáticas o dinámicas exteriores sobre el talud, contrarias a las estabilizantes.

Suponiendo que no existen fuerzas externas sobre el talud, las fuerzas que actúan sobre el plano de rotura son la cohesión y la fricción, en este caso el factor de seguridad está dado por:

$$FS = \frac{\text{Fuerzas cohesivas} + \text{fuerzas friccionantes}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

Uno de los métodos más utilizados para el análisis de equilibrio límite es el método por dovelas, donde el terreno, por encima de la superficie potencial de deslizamiento o superficie de rotura, se divide en segmentos verticales con el propósito de simplificar el análisis.

Existen varias metodologías que utilizan como base el método de las dovelas, que pueden tener diferentes valores de factor de seguridad debido a que se emplean supuestos diferentes para que el problema sea determinado estáticamente, y algunas de las metodologías no satisfacen todas las condiciones de equilibrio. Entre las metodologías que incluyen como base el análisis anterior se encuentran: Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern & Price, Love & Karafiath, Sarma, entre otros. Para este proyecto los análisis de estabilidad se realizaron por el método de

equilibrio límite, y se aplican las metodologías de Janbú Simplificado y Morgenstern-Price.

El primero asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero, reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada y no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos, sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección  $F_0$  para tener en cuenta este posible error; los factores de seguridad son bajos.

El segundo método, asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado, además, supone que la inclinación de las fuerzas entre dovelas varía de acuerdo a una función arbitraria.

Los resultados del factor de seguridad asumen que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla y, por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie de falla.

Según la clasificación de niveles de seguridad del Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (2015), se define el nivel de riesgo como medio ante la pérdida de vidas humanas y de riesgo alto contra daños económicos y ambientales.

Para las condiciones de los taludes evaluados, los factores de seguridad a utilizar son los consignados en el Cuadro 2 que se muestra a continuación:

*Cuadro 2. Factores de seguridad para análisis de estabilidad.*

Condición	Temporal	Definitiva
Estática	1,30	1,50
Pseudo-estática	1,00	1,10

Fuente: Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica, 2015.

Se encuentra también el análisis por medio de métodos numéricos, método de elementos finitos; estos se utilizan para determinar el estado de esfuerzos, deformaciones y el flujo de agua en el terreno.

El factor de seguridad de un talud no se puede estimar directamente utilizando los métodos de análisis numérico. Pero el valor crítico del factor de reducción de resistencia sí, aplicando el método de la reducción de la resistencia al corte, que es el análogo del factor de seguridad obtenido mediante el método de equilibrio límite.

Los métodos de análisis numérico son de gran utilidad para el cálculo de la magnitud y

dirección de las deformaciones en la zona analizada y su uso es indispensable en el análisis de estructuras de gran magnitud como presas, túneles y taludes especiales.

Para el análisis de la estabilidad sísmica de taludes se tienen en cuenta las deformaciones producidas por el sismo, si las fuerzas estáticas y dinámicas debidas al sismo y a la situación del talud superan las fuerzas resistentes del mismo, el factor de seguridad presenta valores por debajo de la unidad, presentándose deformaciones por lo general.<sup>2</sup>

Para el análisis de la condición pseudo-estática se debe definir un coeficiente sísmico, según valores recomendados en el método de Newmark (método de análisis para estimar deformaciones durante sismos)<sup>3</sup> para un factor de seguridad mayor a uno, el coeficiente sísmico ronda entre los valores de 0,15 a 0,25 en el sentido horizontal.

El coeficiente sísmico en el sentido vertical es un porcentaje de este, por lo general de 25%, si se desea realizar un análisis bajo efectos de sismo más fino es posible realizar estudios de amenaza sísmica para el sitio en estudio.

Para el análisis de las deformaciones existen varios métodos, los cuales permiten límites de 5 a 10 cm y otros de 10 a 100 cm, esto tomando en cuenta los materiales dúctiles, con una fácil plastificación que permiten deformaciones mucho mayores.

Newmark establece una relación entre desplazamiento permisible y el nivel de amenaza, con un nivel de amenaza baja permite una deformación de 0,02 m, para un nivel moderado una deformación de 0,5 m a 0,10 m y para un nivel de amenaza alto una deformación de 0,50 m a 1m.

Es importante considerar los métodos de análisis probabilísticos, ya que utilizan parámetros variables, tomando en cuenta la incertidumbre asociada con respecto a factores como: parámetros de resistencia al corte, posición del nivel freático, presencia o inexistencia de este, coeficiente sismo pseudoestático, geometría del talud, entre otros.

<sup>2</sup>Jaime Suárez. (1995). Comportamiento Sísmico de los Taludes. Capítulo 7, Análisis Geotécnico.

<sup>3</sup>Comité técnico del Código de cimentaciones de Costa Rica. (2016). *Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.

Estos factores son importantes ya que intervienen en la determinación y realiza modificaciones respecto al factor de seguridad. Este método se puede utilizar como complemento del análisis determinístico tradicional, aun sin ser indispensable o necesario el uso de esta metodología en el análisis o diseño de taludes.

Lo que permite es evaluar el grado de incertidumbre que se asocia al factor de seguridad, por lo que es importante implementar esta metodología en los análisis tradicionales.

# Sistemas para estabilización y mitigación de taludes/laderas

Identificar y conocer las técnicas para la estabilización de deslizamientos es de suma importancia para elegir con criterio la más adecuada, según las condiciones presentes en sitio, y que sean factibles. La estabilidad de una pendiente mejora cuando se llevan a cabo ciertas acciones.

Para tener éxito, primero hay que identificar los factores más importantes que están afectando la estabilidad del talud, ya sean condicionantes o desencadenantes.

En segundo lugar, hay que determinar la técnica adecuada que debe aplicarse para reducir la influencia de ese proceso, como lo es la estabilización de pendientes por medio de excavación, drenajes, muros de contención, estructuras ancladas, estructuras enterradas, entre otros.

El sistema de mitigación prescrito debe diseñarse de manera que se adapte a las condiciones específicas de la zona y de la pendiente específica que se esté estudiando.

## Estabilización de pendientes

Los movimientos de tierra o excavaciones se realizan con el fin de estabilizar taludes o laderas, se deben realizar según lo estipulado en el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010).<sup>4</sup>

Todos los movimientos de tierra deben ser planteados y analizados previamente sobre un modelo geotécnico adaptado a las condiciones del talud de manera que garantice confiabilidad.

---

<sup>4</sup>Comisión Redactora del CR-2010. Lanamme UCR (2009). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes. CR-2010. Universidad de Costa Rica.

## Remoción de material en la corona

La remoción de tierra en la cabeza de un deslizamiento reduce las fuerzas impulsoras y aumenta la estabilidad, este método es adecuado para hacer cortes en suelos profundos donde se pueden dar deslizamientos por rotación, por otra parte, es ineficaz en fallas de traslación, o en pendientes prolongadas y uniformes.

La reducción de la altura de la pendiente, reduce la fuerza impulsora en el plano de falla, reduce el peso de la masa de suelo. También se puede excavar profundamente y bajar la superficie de la carretera (si la vía atraviesa la parte superior de un deslizamiento).

## Rellenos al pie y escolleras

Eliminar material del pie reduce las fuerzas de resistencia y reduce la estabilidad. La carga aplicada en la cabeza aumenta las fuerzas impulsoras y disminuye la estabilidad.

Por el contrario, colocar la carga en el pie aumenta las fuerzas de resistencia y por lo tanto la estabilidad, por lo que es práctica común colocar rellenos al pie, este puede ser de diferentes tipos como los son: escollera, gaviones, celosías de tierra armada o cualquier otro elemento que funcione a gravedad proporcionando un empuje pasivo.

Este sistema es muy efectivo en deslizamientos no muy grandes de tipo rotacional, que permiten la implementación del sistema en la zona de afectada o vulnerable.

## Contrafuerte relleno de roca

Se trata de incrementar el peso en el pie del deslizamiento, lo que crea una fuerza contraria que resiste a la falla. Es preferible colocación de rocas rotas o escolleras en lugar de tierra, esto debido a que tiene una mayor resistencia a la fricción de las fuerzas de cizallamiento y también

sirve como drenaje del suelo y muro de contención.

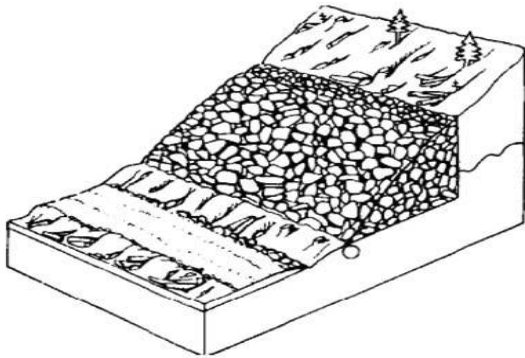


Figura 10. Relleno de roca. Fuente: Manual de Derrumbe, 2008.

## Remoción de bloques inestables

Se deben remover los bloques que generan inestabilidad en el talud/ladera, como los son los bloques de roca que pueden rodar, estos pueden ser eliminados manualmente, con equipo mecánico o con voladura controlada. Se debe considerar que en taludes rocosos muy fracturados es inadecuado realizar esta técnica.

## Bancos

Son escalones cortados en un suelo profundo o en una roca, esto para reducir las fuerzas motrices. Son eficaces para reducir la incidencia de fallas superficiales. Son útiles para la protección de acantilados de roca penosos a caídas.

## Relleno con materia ligero

Es una técnica relacionada con la reducción de la altura consiste en excavar la parte superior de la tierra y reemplazarla con un material de relleno ligero, luego se cubre con una capa delgada de material grueso y el material de relleno puede servir como de base para el tráfico de uso limitado.

## Aplanamiento o reducción del ángulo de inclinación

Reduce el peso del material y reduce la posibilidad de erosión del cauce de los ríos o cargas de construcción, no siempre es eficaz realizar esto, por lo general en pequeñas depresiones o pequeñas fallas de rotación. La excavación a gran escala de áreas de deslizamientos no es recomendada, ya que no siempre es eficaz, para fallas planas grandes la excavación puede no hacer que se detenga el movimiento, puede desencadenar un deslizamiento de tierras más grande al eliminar el apoyo en el pie del deslizamiento. La excavación puede desestabilizar el terreno más arriba de la pendiente al socavar.

## Presas de contención

Son presas pequeñas de almacenamiento de sedimentos, se utiliza para controlar la frecuencia y el volumen de los escombros, son costosas de construir, por lo que se utilizan solo en casos de gran importancia.

Estas presas tienen diversos propósitos cuando se instalan en los canales: eliminar la incidencia de fallas al reducir el gradiente del canal, reduce el volumen de material almacenado en el canal impidiendo el corte de este y almacena los sedimentos de la corriente de escombros.

Cuando se instalan las presas de contención en los deslizamientos de escombros, las presas almacenan el material desprendido, lo que crea pequeñas terrazas en el deslizamiento, reduciendo la inclinación de la superficie.

## Revestimiento de talud

Controla la erosión superficial en el talud, se realiza en taludes excavados previamente, utilizando concreto hidráulico, geo-textiles, adoquines, mampostería.

## Refuerzo malla plástico

Existen varios materiales en el mercado, principalmente un polímero plástico estirado el cual permite formar una malla liviana con alta resistencia a la tensión. Esta malla añade fuerza a la resistencia al corte del suelo.

# Drenajes

Otro factor para considerar es la presión de poro, cuando se da una reducción de la capa freática aumenta las fuerzas de resistencia y la estabilidad, y por el contrario cuando hay un aumento en la capa freática disminuye la resistencia y la estabilidad. Por esto es importante implementar sistemas de drenajes. Se deben seguir las normas estipuladas en el Código Geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica.

## Nivelación Sitio

Se refiere a suavizar la topografía de la superficie de deslizamiento, esto para evitar que el agua de la superficie se almacene o se conecte con el agua subterránea, cualquier tipo de depresión que pueda almacenar agua debe eliminarse.

## Drenaje superficial

Incluye los elementos como zanjas y desagües, es un sistema de drenaje superficial, es conveniente en la cabeza del deslizamiento, son eficaces una serie de zanjas de corte que cruzan el terreno y los drenajes laterales para dirigir el escurrimiento del agua que se presenta alrededor del deslizamiento.

El tipo más simple de drenaje del subsuelo es la zanja lateral construida arriba de una ladera inestable.

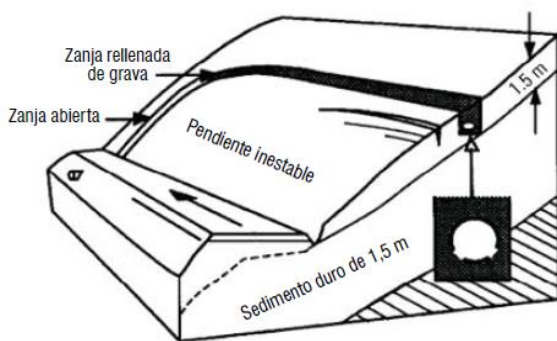


Figura 11. Zanjas para desagües Fuente: Manual de Derrumbes, 2008.

## Drenajes profundos / Tuberías drenaje

Las tuberías de drenaje son tuberías de desagüe horizontal, es un sistema utilizado para prevenir deslizamientos en la construcción de carreteras, cumplen mejor su función si se instalan durante la excavación inicial, estos son eficaces si se instalan de manera correcta que permita que el tubo cruce la superficie de falla y drene el suelo.

Se realizan desde el pie hasta las bermas, tiene como objetivo principal abatir el nivel freático para disminuir la presión de poro y mejorar la estabilidad de los taludes.

Cada uno de estos sistemas debe diseñarse individualmente debido a que la mayoría de los suelos tienen pendientes, condiciones hidráulicas y geométricas diferentes.

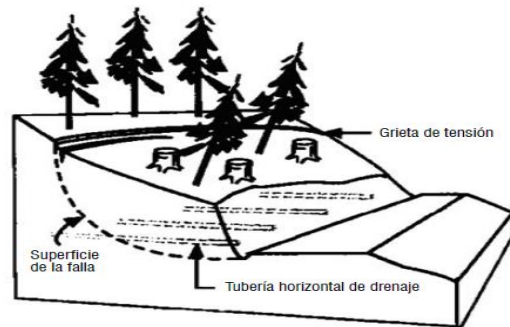


Figura 12. Tuberías de drenaje Fuente: Manual de Derrumbes, 2008.

## Muro de contención

El diseño de cualquier tipo de muros debe garantizar la estabilidad contra el deslizamiento y la capacidad de carga de la cimentación adecuada según el Código de Cimentaciones de Costa Rica.

Existen varios tipos de muros, muros en voladizo, muros por gravedad, muros flexibles, y muros de suelo reforzado, según el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica. A continuación, se presentan algunos muros específicos para la estabilidad de taludes y laderas:

### Armazones de madera

Las paredes son hechas de madera, son estructuras construidas con troncos entrelazados y rellenas de material grueso, este tipo de muro

trabaja intersecando la superficie crítica de deslizamiento.

La estructura debe ser capaz de soportar rotura, vuelvo y deslizamiento en la base, ya que este sistema funciona para volúmenes pequeños de suelo estabilizado.

La estructura de armazón debe tener un volumen como mínimo igual al 10% ó 15% del volumen del suelo a estabilizar.

## Muro Cajón de acero

Es un muro que consiste en un cajón de acero formado por componentes de acero galvanizado corrugado, que están unidos entre sí para formar una caja que se rellena con tierra.

La estabilidad del muro se logra con el peso de la propia pared ayudado con el peso del suelo frente a la pared. El ancho de la pared varía de 2 a 5 metros, la altura es de la mitad o tres quintas partes de la pared para proporcionar resistencia al deslizamiento, y el pie de la pared está a una profundidad de 0,5 a 1,0 metros por debajo del nivel del suelo.

## Muro de tierra reforzada

Este es un sistema para la construcción de rellenos en ángulos muy elevados o verticales sin la participación de estructuras de apoyo en la cara del relleno. El sistema consiste en capas horizontales de tiras de metal flexibles dentro del relleno, lo que forma un sistema compuesto de alta resistencia.

## Muro de gaviones

Un muro de gaviones está compuesto por contenedores, hechos de cajas de malla de alambre llenos de piedra de 10 a 20 cm. Este sistema no es caro, son fáciles y rápidos de construir.

Poseen una gran flexibilidad por lo que soportan movimientos de los cimientos, debido al relleno grueso de los contenedores son muy permeables y brindan un buen drenaje.

Estos sistemas funcionan debido a que la fricción entre las hieleras de los bloques individuales es muy alta, de igual forma entre la fila y el suelo. En suelos arcillosos se requiere

contrafuertes adheridos al muro de gaviones para brindar mayor estabilidad.

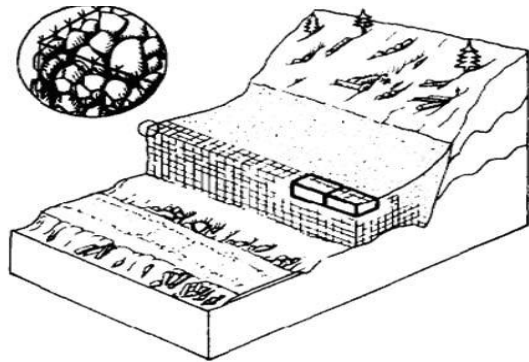


Figura 13. Muro de gaviones Fuente: Manual de Derrumbes 2008.

## Estructuras enterradas

### Pilotes

Hay dos tipos según la metodología de construcción, hincados o pre excavados. Son de concreto, reforzado, acero o madera, sirven para estabilizar movimientos de masa poco profundos, donde existe un suelo capaz de soportar los pilotes debajo de la superficie de falla.

Los pilotes deben poseer un diseño previo para que soporten la carga lateral, además de un empotramiento adecuado. En la base de una pendiente se pueden colocar pilotes de gran diámetro para formar una pared vertical. Esto se utiliza como un sistema de retención previo a la excavación.

### Pilas

Son elementos de concreto reforzado, que deben pasar a través de la superficie de falla y se entierran en roca o suelo competente, se deben anclar a un suelo competente que genere una resistencia lateral que le brinde capacidad de soporte, no se requiere cortar el talud para construirlas, utilizan sistemas convencionales de construcción, pueden ejecutarse en sitios de difícil acceso y también pueden ser construidas varias a la vez.

Las pilas deben diseñarse para soportar carga lateral y garantizar una profundidad de empotramiento adecuada. Una de las desventajas es que son de un costo elevado.

## Estructuras Ancladas

Se garantiza la estabilidad de las estructuras por medio de anclajes que transfieren las cargas al terreno, existen anclajes pasivos y activos. Los anclajes pasivos son barras de acero embebidas en lechada, los anclajes activos son tendones de acero que tienen una alta resistencia a la tensión, pretensados con un bulbo que transmite las cargas al terreno. Se utilizan como estructuras de contención, para la estabilización de fallas en suelos de tamaño variable.

## Estabilización de pendientes por medio de vegetación

El uso de vegetaciones como gramíneas y leguminosas reduce la erosión de la superficie, donde existir deslizamientos de tierra. La plantación de tipos de arbustos que genera una cubierta vegetal fortalece los sistemas de raíces y mejora la estabilidad del talud.

## Protección biotécnica de laderas

Este sistema reduce las consecuencias en el medio ambiente, pretende brindar protección a laderas, e cuanto a la mitigación de deslizamientos. Estos sistemas incluyen geomallas ancladas con estacas clavadas al suelo. Un tipo de planta adecuado para combatir la erosión es el vetiver, o tipo de hierba que funciona bien en ambientes con condiciones diferentes para la estabilización de taludes contra la erosión.

# Instrumentación Geotécnica

La instrumentación geotécnica se compone de sistemas de monitoreo y alerta. Tienen como objetivo principal corroborar el modelo geotécnico de un talud o ladera, detectar anomalías y la protección de vidas humanas, así como de las estructuras construidas, el ambiente y la inversión económica realizada.

La instrumentación geotécnica no evita por sí sola la inestabilidad de la zona, pero brinda datos de gran importancia para realizar análisis y tomar decisiones importantes en la administración de los riesgos debido a vulnerabilidad de deslizamiento.

Por lo anterior, la planeación de un sistema de instrumentación se vuelve necesaria, así como definir el tipo y la ubicación de los equipos, que son aptos para las condiciones específicas, en este caso se indaga en la instrumentación geotécnica en carreteras.

La instrumentación geotécnica puede medir: movimientos superficiales, movimientos internos en el terreno, movimientos por la formación de grietas, las presiones intersticiales y los empujes del terreno sobre elementos de construcción.

La mayoría de los aparatos o equipos son diferentes, así como la frecuencia de las lecturas y la toma de datos, ya que estos dependen de las magnitudes que se desean medir y la velocidad del proceso que se pretende controlar. Las lecturas pueden ser tomadas manual o automáticamente, dependiendo del equipo, la periodicidad y la ubicación de los puntos de lectura.

## Importancia de la instrumentación

Es importante porque permite prever el movimiento, la sobre carga, o cualquier situación en el terreno y tomar acciones correctivas antes de que sea mayor la afectación. La instrumentación es una herramienta vital, para el control y la calidad de diferentes obras de infraestructura, la cual permite actuar en el tiempo correcto y así brindar mayor seguridad a

las obras y a los usuarios. Existen diferentes tipos para la medición de los desplazamientos, estos tipos de instrumentación se explican de manera individual a continuación:

## Medida de desplazamientos

Estos instrumentos son utilizados para medir los movimientos en el terreno, ya sea externa o internamente y por diferentes causas como fallas.

## Desplazamientos entre puntos próximos

Se utiliza para el control de movimientos entre puntos próximos que se encuentran en superficie o dentro de un túnel, se pueden encontrar los siguientes instrumentos:

Equipo con sistemas de lectura mecánico: Se utilizan cintas de convergencia, cinta métrica, calibre y flexómetro. El equipo que utilizar depende de la precisión que se necesite.

Equipo con sistema de lectura eléctrico: Permiten automatizar el proceso en cuanto al registro de los datos y los puntos accesibles a controlar. Entre estos están: el potenciómetro, LVDT y cuerda vibrante.

## Desplazamientos entre puntos situados en superficie

### Métodos geodésicos

Permite medir movimientos horizontales y verticales, se pueden utilizar tres sistemas: con la triangulación se miden los ángulos desde dos o más bases fijas. La trilateración mide las distancias desde tres o más bases fijas. Y la poligonación mide los ángulos y las distancias desde al menos tres bases fijas.

## Nivelación

Permite medir movimientos verticales, con precisiones altas, las medidas se realizan desde referencias fijas, la toma de datos se realiza de manera rápida y simple.

## Colimación

Permite medir movimientos horizontales perpendiculares al plano de colimación. Los puntos de control se ubican respecto a un plano vertical fijo. Es importante que los puntos de control se ubiquen fuera de la zona inestable.

## Testigos Superficiales

Se trata de estructuras construidas sobre la cara de las laderas o taludes, siendo afectados por los movimientos presentes en la zona horizontal y verticalmente, localizados en la zona por medio de la topografía y son comparados con las mediciones iniciales de referencia.

Se toman las medidas de forma manual con una estación total o equipo de topografía como prismas. Algunas de las casas fabricantes más conocidas son: Leica, SOKKIA.



Figura 14. Prisma, Manual de equipo topográfico SOKKIA.

## Desplazamientos profundos

### Inclinómetros

Controla los movimientos transversales, por medio de un sondeo. Este método consiste en medir las inclinaciones en diferentes puntos internos, mediante una sonda que transmite una señal eléctrica proporcional a la inclinación. Son instrumentos que miden el cambio de pendiente y desplazamiento del terreno, mediante el uso de una tubería guía colocada en un relleno mediante el paso de una sonda guiada o fija en el interior de la tubería. Se colocan por lo general alineados paralelos a la corona del talud. Algunas de las casas fabricantes de estos instrumentos inclinómetros verticales o digitales son: RST Instruments, SISGEO, SLOPE INDICATOR.



Figura 15. Inclinómetro Vertical, Manual Inclinómetro vertical Geokon.

### Extensómetros

Miden movimientos entre dos puntos, uno de los puntos se ubica en la parte superior del sondeo y el otro en el interior, fijado por medio de un anclaje. Funciona de tal manera que los desplazamientos en estos puntos se transmiten al sondeo mediante varillas, midiéndose así los desplazamientos generados. Son medidores de juntas o grietas, ya que miden el cambio de distancia entre dos puntos, ya sea en una superficie rocosa, en estructuras de concreto o en

juntas constructivas. Los desplazamientos pueden ser medidos hasta en tres direcciones, por medio de los instrumentos fabricados por: Geo Kon, RST Instruments, SISGEO, SLOPE INDICATOR.



Figura 16. Extensómetros de grietas unidireccionales en tres dimensiones. Manual SISGEO.

## Reflectómetro del dominio tiempo

Son utilizados para medir planos de falla en una zona inestable, funciona con voltaje el cual refleja los cambios por medio de cables. La principal casa fabricante es CAMPBELL SCIENTIFIC.



Figura 17. Reflectómetro dominio tiempo. TDR. Catalogo Campbell Scientific.

## Deformaciones en pozos y obturación de sondeos

Otro de los métodos es la observación de la deformación en pozos con revestimiento discontinuo, permitiendo medir la deformación o la rotura en el terreno.

## Medida de presiones intersticiales

### Tubería piezométrica ranurada

Se instala una tubería de PVC, ranurada, abierta en ambos extremos, colocada a lo largo de todo el sondeo. Se mide la altura que alcanza el agua dentro de la tubería, el período puede variar entre horas, días o hasta meses.

### Piezómetro abierto

Consiste en asilar un tamo de sondeo, instalar una tubería ranurada, midiendo la altura del agua (altura piezométrica del tramo). Es una sección de tubo con ranuras, o cerámica porosa compuesto por diferentes diámetros de tuberías internos, donde la columna de agua asciende por la tubería, midiendo de esta manera la presión de poro en el terreno. Las casas fabricantes son: Geo Kon, RST Instruments, SISGEO, SLOPE INDICATOR.

### Piezómetro eléctrico de cuerda vibrante



Figura 18. Piezómetro cuerda vibrante. Catálogo Geokon.

Son utilizados para medir la presión de poro en el terreno, pueden ser sellados en perforaciones, colocados con relleno, o suspendidos en pozos. Las casas fabricantes son: Geo Kon, RST Instruments, SISGEO, SLOPE INDICATOR, DIVER.

## Piezómetro cerrado

Se inicia aislando un tramo, se instala un sistema de lecturas que registre la presión intersticial. Este sistema que se utiliza en terrenos poco permeables ya que el tiempo de respuesta es corto. Eso permite conocer el tipo de acuífero presente en el terreno y las implicaciones de permeabilidad, que inducen a problemas geotécnicos.

## Medida de presiones internas

Se miden las presiones, que ocurren debido a cargas o empujes del terreno y de estructuras vecinas. Este tipo de medición se realiza mediante células de presión total, para medir tensiones o cargas a anclajes se utilizan las células de carga.

## Células de presión total

Este método consiste en dos placas de acero soldadas, rellenas con fluido ya sea aceite o mercurio en su interior, la presión que el terreno ejerce sobre las células se transmite por el fluido hasta un lector de presión. El lector de presión puede ser neumático, hidráulico o eléctrico. Las células de presión tienen varios usos, los más comunes son en terraplenes que experimentan precargas, para estructuras de contención y revestimiento de túneles.

Pueden medir la presión total en rellenos, o terraplenes, consiste en una capsula compuesta de dos placas de acero de forma circular o rectangular y se llena de fluido no compresible entre las caras internas conectando esto a un transductor por medio de una tubería de acero inoxidable. Las casas fabricantes son: Geo Kon, RT Instruments, SISGEO, SLOPE INDICATOR, DIVER.

## Células de carga

Se utilizan en anclajes para medir las tensiones transmitidas al terreno por parte de estos, así como la tensión en el anclaje.

Se deben elegir puntos de medición entre estos, la cabeza del anclaje y el terreno. Las células pueden ser de varios tipos como se explica a continuación:

Mecánicas: Las deformaciones se miden directamente con ayuda de un comparador.

Hidráulicas: Las deformaciones se miden con células que contienen cámaras de aceite que transmiten la carga.

Eléctricas: Son células cilíndricas metálicas, donde la deformación es transmitida a sensores eléctricos.

## Parámetros de medición para el uso de instrumentación

Los parámetros de medición son importantes para definir el tipo de instrumentación a colocar en cada una de las zonas vulnerables, por esto se explican a continuación:

Desplazamientos Superficiales: Se refiere a los movimientos superficiales que se presentan en un terreno, ya sean verticales u horizontales, estos pueden ser medidos mediante dos puntos o bases, tres bases o más.

Desplazamientos Profundos: Se refiere a los movimientos que se dan a lo interno de un terreno a una profundidad determinada, esta puede variar según el estudio que se desee y el tipo de instrumentación a utilizar, mide los movimientos y deformaciones que se presentan en el terreno.

Presiones intersticiales (internas): Permiten medir la presión de poro en el terreno, que se da por el contenido de agua o humedad en la zona específica.

Presiones de empuje: Son las presiones ejercidas por el terreno, fuerzas de empuje que generan desplazamiento o el movimiento de los materiales presentes en la zona. Se pueden dar por cargas ejercidas en el terreno, o por el mismo peso de la masa del terreno por acción de la gravedad.

# Introducción

La infraestructura vial en el país es un tema de gran importancia, ya que brinda oportunidades de desarrollo, comunicación y mejora del transporte, por lo que es vital; la calidad, el funcionamiento y la seguridad de las carreteras.

La ruta 35, es una vía de alta importancia económica ya que une la zona agrícola de San Carlos con la gran área metropolitana, además de pertenecer a un corredor de carreteras mesoamericanas. Ya hace 4 décadas que se pensó en la construcción de esta importante carretera, pero debido a las dificultades tanto en los procesos administrativos como técnicos se han generado trabas que se reflejan en retrasos significativos.

Uno de los problemas de la zona, geológicamente hablando es la inestabilidad de los taludes de corte, debido a los suelos de baja calidad de tipo poroso, los cuales permiten una variación en las presiones intersticiales, así como en el peso del terreno, promoviendo la saturación del suelo, que generan deslizamientos y demás problemas que claramente afectan la construcción de la carretera, ya que no poseen una estabilidad certera.

Se encuentra en la zona una serie de fallas geológicas, como lo es la Falla de Zarcero la cual es una falla Neo tectónica, que atraviesa parte de la zona en construcción de la nueva carretera y otras fallas locales conocidas como Paleo tectónicas, producto de la formación geológica.

Otra problemática es la existencia de zonas de deslizamientos antiguos con evidencias geomorfológicas como la formación de lagunas, algunas de las cuales están siendo estudiadas por la entidad correspondiente (SETENA). El origen o la formación de estas lagunas se han dado principalmente por los mismos deslizamientos y acumulación de agua drenada en la zona, aun así, algunas de estas lagunas cuentan con gran profundidad y dan un gran paisaje a la zona. Se han dado deslizamientos debido a la socavación por parte de los riachuelos que existen en la zona, por un tema de

la dirección de cause se generan corrientes que poco a poco van arrastrando el suelo, hasta que este se vuelve inestable, afectado gran parte de la carretera ya construida con grandes pérdidas de material. Con base en estos fundamentos se ha vuelto necesaria la búsqueda de soluciones para minimizar el problema y poder estabilizar el terreno.

Debido a las problemáticas presentes antes mencionadas en la zona, la importancia que la carretera representa y el alto costo de construcción, surge la necesidad de realizar una evaluación de los sectores vulnerables y el planeamiento de un sistema para el control y monitoreo de los mismos, que garantice la integridad y funcionalidad de la carretera, de manera que permita la toma de decisiones, en cuanto a acciones correctivas.

## Objetivos

1. Realizar una evaluación de los sectores vulnerables de la carretera: ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia.
  - 1.1. Identificar y ubicar los sectores con presencia de zonas inestables en la totalidad del corredor vial.
  - 1.2. Realizar una caracterización y clasificación de los sectores críticos que presentan zonas inestables.
  - 1.3. Analizar la inestabilidad los dos taludes más críticos por medio de un análisis geotécnico utilizando los programas Slide y Phase2 para el método de estado límite y elemento finito respectivamente.
2. Plantear acciones correctivas y de monitoreo para evitar o minimizar afectaciones en la vía.
  - 2.1. Proponer acciones correctivas para las zonas críticas que eviten o minimicen la interrupción del tránsito en la vía.
  - 2.2. Proponer instrumentación de monitoreo geotécnico para prevenir afectaciones en la vía.

## Alcance y Limitaciones

El proyecto se limita a las acciones correctivas en las zonas afectadas o con vulnerabilidad de deslizamiento, como soluciones conceptuales con base en estudios de la zona, inspección e investigación, ya que al ser una cantidad significativa de zonas identificadas, no fue posible realizar el análisis de todas en el periodo de estudio, solamente dos zonas críticas con necesidad de una rápida intervención fueron analizadas con un método numérico y poseen una solución técnica planteada de manera completa. Es importante considerar que no se contaba con información relevante como geofísica o estudios de suelos, en todas las zonas afectadas que permitiera realizar análisis más extensos.

La ejecución de ensayos de laboratorio así como el estudio del balance hídrico en los suelos se encuentra fuera del alcance de este proyecto, aún así es importante destacar que el proyecto se basa tanto en la información recopilada en las inspecciones a campo como en estudios previos realizados por diferentes empresas.

Se limita a la ubicación de los instrumentos, otros temas relacionados como el diseño del sistema de instalación para los instrumentos electrónicos y la planeación para dar el mantenimiento requerido del sistema, se salen del alcance del proyecto.

A parte de las cotizaciones para la selección del sistema de instrumentación y sistema constructivo, no se presupuestaron costos para la propuesta realizada. Los instrumentos analizados se limitan a los parámetros de medición deseados. En el momento de realizado el proyecto no se contaba con análisis necesarios para afinar la ubicación definitiva de algunos instrumentos.

# Metodología

En este apartado se indica cómo se realizó la identificación y evaluación de las zonas vulnerables en la ruta 35, Sifón-La Abundancia y como se elaboró el planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo. Elaborado en la empresa Asesorías GEOTEC S.A., ubicada en Grecia, provincia Alajuela.

A continuación, se presenta cada una de las etapas para la elaboración del proyecto:

- Etapa 1: Identificación y Ubicación de zonas vulnerables.
- Etapa 2: Clasificación y caracterización de zonas críticas.
- Etapa 3: Análisis geotécnico.  
Planteamiento de acciones correctivas.  
Planteamiento de instrumentación para monitoreo.

Se explica cada una de las etapas anteriores para una mejor comprensión del proceso y métodos utilizados para la evaluación de zonas vulnerables y el planeamiento de las acciones correctivas y de monitoreo.

## Identificación de zonas vulnerables

La evaluación de zonas vulnerables o con presencia de deslizamientos, inicia con la recopilación e integración de la información aportada por los estudios realizados anteriormente en este corredor vial, así como la revisión de las hojas cartográficas y fotografías aéreas ya existentes, para identificar los sectores que ya poseen problemática. Por lo que se encuentra una serie de estudios realizados en diferentes zonas, de las cuales se realiza una base de datos en MS Excel, para que sean identificados y así determinar si estos ya han sido intervenidos.

Se realizan visitas al sitio para verificar la existencia de estos sectores y de otras zonas posiblemente afectadas. De las acciones anteriores se identifican diversas zonas, entre estas zonas se clasifican como zonas vulnerables a deslizamientos, zonas con presencia de deslizamientos y zonas intervenidas para corrección y mejora de la vía.

Los indicadores para la identificación de cada una de las zonas, se basan principalmente en la presencia de materiales deslizados, de estructuras construidas para la estabilidad y de la presencia de factores tanto condicionantes como desencadenantes que generen vulnerabilidad en la zona.

Una vez identificados, se determinó la ubicación por medio de GPS, con lo que se realizó un mapa geográfico para tener de manera gráfica la ubicación de cada uno de estos puntos, con su respectiva descripción según la clasificación antes mencionada por zonas. Las zonas identificadas se adjuntan en la base de datos para tener acceso a la información de manera completa y rápida.

Parte de la identificación de las zonas vulnerables o con deslizamiento permite conocer las causas o factores impulsores de deslizamientos, que es de vital importancia para entender la problemática en la zona y así poder brindar soluciones o acciones correctivas y de monitoreo en las zonas identificadas posteriormente.

Para la determinación de los factores que influyen en la inestabilidad de las zonas del corredor vial, se hizo un estudio previo de los factores condicionantes y desencadenantes a modo de investigación (Luis L Gonzales de Vallejo, M. F. 2002), se obtuvo la información existente por parte de los informes previamente realizados de la mano con la inspección en campo, donde se realizaron diversas visitas al campo, con lo cual se determinó cuáles son específicamente los factores que influyen y

aceleran el proceso de deslizamiento e inestabilidad en la zona.

Con esta información se elaboraron Cuadros y graficas en MS Excel para una mejor interpretación de los resultados obtenidos en la investigación.

Se realizó una matriz de afectación de la vía, para la totalidad de las zonas identificadas (49 zonas) con el fin de determinar las zonas con una condición crítica, para su posterior estudio y análisis.

## Clasificación y caracterización

Seguido del estudio de la información disponible y de la inspección inicial de las condiciones de los taludes o ladera, se realiza el estudio y reconocimiento geológico preliminar, así como el estudio de la topografía.

Para esto se eligieron las 13 zonas críticas, donde se han realizado estudios previos por parte de la empresa Asesorías GEOTEC S.A., para elaborar una caracterización y clasificación con base en información de los estudios realizados en campo previamente y los informes existentes geológicos y geotécnicos, así como la inspección de campo.

Esto con el objetivo de determinar las características y propiedades más críticas de la zona. La caracterización geológica y geotécnica de los depósitos en cada una de las zonas críticas se realizó para determinar la influencia de los materiales en la inestabilidad de la zona o el deslizamiento como tal.

Primeramente, se identificó cuales materiales estaban presentes en cada una de las zonas, junto con su respectiva descripción geológica. Seguido de esto se realizó una matriz por medio de MS Excel para identificar cuales materiales similares se encontraban en cada una de las zonas de estudio.

Seguido de esto se clasificó cada una de las unidades geológicas, según el tamaño de las partículas y la clasificación SUCS, asignando a cada unidad geológica un nombre y símbolo de grupo, de igual forma se hizo una matriz con las características granulométricas para unificar los materiales encontrados y así determinar características similares.

Se procede a la asignación de las características geo-mecánicas de cada una de las unidades, para realizar una comparación del posible comportamiento de los materiales en diferentes zonas. Se realizó la clasificación de las zonas críticas, al analizar los factores condicionantes y desencadenantes específicamente, como: geometría (altura y pendiente) características geológicas y geotécnicas de los materiales presentes, meteorización, deforestación, erosión, cambios hidrológicos, peso propio por gravedad, procesos hidrotermales, y cambios en la geometría por socavación. Y según criterios específicos como el tamaño de la masa desplazada, la evolución con el tiempo la presencia o no de movimientos activos o antiguos, factores antrópicos, afectación de la vía, de manera que se indique el grado de inestabilidad.

Esto se realizó con el análisis y la comparación de la información recolectada, por medio de la elaboración de una matriz de clasificación en MS Excel. Se estableció una escala representativa para los factores, donde todos los factores tienen una misma escala de 0 a 3 en valor, esto para poder realizar una comparación entre los mismos, pero cada factor tiene un criterio diferente para dar el valor a cada zona. Sumando la totalidad de los factores, se tiene un valor de 30, donde la zona que presente mayor valor será la de mayor inestabilidad.

Es importante destacar que la clasificación de inestabilidad por medio de la matriz se realizó por medio del criterio-experto, con el análisis de la información recopilada, la ayuda de profesionales en el área tanto de ingeniería civil como geología.

Esto con el objetivo principal de obtener una clasificación de inestabilidad que contemplara los distintos factores que promueven y poseen gran participación en la inestabilidad de la zona afectada, estudiados e identificados previamente.

## Análisis geotécnico

Se eligieron las dos zonas críticas, con mayor vulnerabilidad donde se presenta mayor problemática y es necesario una rápida intervención para evitar daños de gran magnitud o afectación en la construcción de la vía.

Las zonas críticas elegidas fueron taludes ubicados en las estaciones 30+700 y la 36+130, ya que son las zonas con mayor inestabilidad según su clasificación.

Se obtiene la información acerca de la composición o estratos de cada uno de estos taludes o laderas a partir de los informes de estudios realizados en sitio, con lo que se elaboró el modelo geotécnico correspondiente para cada zona, por medio de AutoCAD se dimensionaron los modelos geológicos-geotécnicos. Se analizó la estabilidad en condiciones naturales de los dos taludes más críticos por medio del programa de equilibrio límite Slide de Rocscience®, obteniendo los Factores de Seguridad y comparando estos con los valores permisibles especificados en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica, así como los esfuerzos y deformaciones obtenidas por método de elementos finitos con el programa Phase2. A continuación, se explica el procedimiento para modelar los taludes y realizar el análisis de estabilidad en los programas.

Para realizar el modelo del talud, primero se introdujeron las características de suelos presentes en los sitios, estas se denotan y se presentan en la sección de resultados, por medio de las coordenadas en obtenidas de AutoCAD se traza el perfil de los taludes, de las zonas críticas elegidas.

Una vez construidos los modelos se exportan a los softwares Slide y Phase 2 de Rocscience, realizando el análisis de los taludes, en estos es considerado la influencia que tiene sobre el factor de seguridad, la variación en el nivel freático, la condición sísmica, el cambio en las características de los materiales y el efecto de las cargas externas.

Analizando la falla por resistencia al corte, que mide un desplazamiento relativo de una porción del talud con respecto a la masa adyacente, para realizar el análisis se supone que la falla se produce a lo largo de una superficie discreta, siempre y cuando el movimiento se pueda presentar en una zona o estrato de espesor considerable.

El programa Phase2 de Rocscience®, trabaja con elementos finitos, presentando resultados de los esfuerzos y la deformación que se produce en la masa de terreno, lo cual permite un análisis adecuado de las zonas en estudio. Con el Phase2 se analiza la deformación en un talud, es excesiva cuando compromete la

condición de servicio de la obra en estudio. Las deformaciones en un talud se pueden presentar por diferentes fenómenos, y dependen de las características y propiedades de los materiales presentes.

## Planteamiento de acciones correctivas

Una vez analizados los sitios vulnerables, se procede a la planeación de las acciones correctivas, según las características, la clasificación y el análisis de estos sectores vulnerables, esto para mejorar las condiciones de la carretera y de la zona donde existe un deslizamiento y un riesgo grande de mayor afectación.

Se investigaron las acciones correctivas que pueden implementarse en las zonas críticas estudiadas en la sección anterior, para los estacionamientos 30+700 y 36+130 se plantea una solución técnica, la cual se desarrolla individualmente para cada una de las zonas, con su respectivo diseño geométrico y memorias de cálculos en caso de requerirlo.

Luego de plantear la solución se realizan los análisis de estado límite y deformaciones utilizando los programas Slide y phase2 de Rocscience, siguiendo el procedimiento de esta sección "Análisis Geotécnico" para determinar la estabilidad que brinda a cada zona las soluciones planteadas.

Para el resto de las zonas se plantean soluciones a manera de recomendación para la estabilización de cada sitio específico según las condiciones presentes, la previa investigación de las zonas, así como de las técnicas de estabilización recomendadas.

## Planteamiento de instrumentación de monitoreo

Se inició una investigación sobre el mercado actual de los equipos de instrumentación utilizados para monitorear problemas geotécnicos

en carreteras. Instrumentación geotécnica adecuada para monitorear factores como movimientos de masa externos e internos, cambios de inclinación en el talud, determinación de fallas o grietas en el terreno, condiciones de humedad o presión de poro en el terreno que favorece el aumento de las presiones intersticiales entre otros.

Con esto y un análisis básico del modelo de deslizamiento en cada sitio de estudio se definió el tipo, la ubicación y recomendaciones para el control de los equipos de instrumentación, esto con el objetivo de controlar el comportamiento de estas zonas, prevenir posibles afectaciones en la vía y poder ejecutar acciones al tener un control del comportamiento de los cortes.

# Resultados

## Identificación y Ubicación de Zonas Vulnerables

Siguiendo los procedimientos descritos en la metodología, se logró identificar un total de 49 zonas con presencia de inestabilidad o vulnerabilidad a lo largo del corredor vial.

De la totalidad de zonas identificadas 26 de estas cuentan con estudios previos, realizados por diferentes empresas, como: Vieto & Asociados S.A, D'Geo S.A, INGEOTEC S.A., GEOINPER de Costa Rica S.A., INSUMA S.A. ,GEOMECKA S.A., Constructora Sánchez Carvajal y Asesorías GEOTEC S.A.

De igual forma existen estudios de ingenieros civiles y geólogos reconocidos como lo son Gastón Laporte Molina y Jorge Arturo Herrera en diferentes etapas de la construcción para zonas específicas a lo largo de la carretera.

Es importante considerar que algunas de las zonas cuentan con estudios y análisis completos en cuanto a estudios de suelo, geofísica y análisis de estabilidad, mientras que en otras solo se realizó un tipo de inspección visual. Se puede observar en la sección de apéndices la información general correspondiente de los estudios realizados por las empresas, los cuales van desde el año 2009 hasta el año 2017.

Las zonas se encuentran divididas en cuatro categorías para una mejor distribución, entendimiento y estudio, estas se explican a continuación:

a) Zonas con deslizamientos: Como su nombre lo dice, son aquellas zonas donde se ha presentado uno o varios deslizamientos, ya sea de pequeña, mediana o grande magnitud. Estas zonas no han sido intervenidas para implementar acciones correctivas, algunas poseen el diseño geométrico de corte para la construcción de la carretera previamente al deslizamiento.

b) Zonas con vulnerabilidad de deslizamientos: Estas zonas son las que poseen algún factor que genera inestabilidad, que pudo

identificarse de manera visual en el sitio, como problemas de erosión, suelos saturados, pendientes elevadas, entre otros, por lo tanto, son aquellas zonas que son vulnerables a un deslizamiento, y que hasta el momento se ha generado ni tampoco han tenido algún tipo de intervención por parte del ser humano para prevenir el fenómeno.

c) Zona intervenida: Las zonas intervenidas son aquellas zonas con presencia de inestabilidad, por diferentes factores, en las que se tomaron medidas y acciones correctivas para prevenir y evitar más daños en la c carretera. Las zonas han sido intervenidas con estructuras para brindar estabilidad generalmente a los taludes o laderas afectadas, como muro de gaviones, muro de escolleras, drenajes, zanjas de desagüe, revegetación, disminución de la pendiente, entre otros.

d) Zonas intervenidas con deslizamiento: Son aquellas zonas donde se ha presentado algún tipo de intervención como la mencionada anteriormente, que no ha sido efectiva, y por lo tanto al no cumplir con la funcionalidad se presentan los deslizamientos y afectaciones en la vía.

Los resultados obtenidos en la etapa de identificación se muestran en el Cuadro 3.

*Cuadro 3. Zonas Vulnerables Ruta 35 Sifón-La Abundancia.*

Tipo de zona	Cantidad
Zona Vulnerable a deslizamiento	4
Zona con presencia de deslizamiento	25
Zona Intervenida	12
Zona Intervenida con deslizamiento	8

Al realizar el reconocimiento en campo, se identificaron 49 zonas con presencia de inestabilidad en el tramo que comunica Sifón y La Abundancia, las cuales se clasificaron en: zonas vulnerables, zonas con presencia de deslizamientos, zonas intervenidas y zonas

intervenidas con deslizamiento, como se muestra en el Cuadro 3.

De las 49 zonas identificadas con presencia de inestabilidad en total, 25 poseen un deslizamiento, clasificado como pequeño, mediano o grande según la magnitud y geometría de este observada en campo, 12 de las zonas han sido intervenidas por muros de contención, sistemas de drenaje, cortes de ladera, entre otros.

De igual forma se identificaron 8 zonas intervenidas que presentan deslizamiento, y 4 zonas propensas a un deslizamiento pronto.

Parte de los objetivos es la ubicación de cada una de las zonas con inestabilidad, por lo que se registró por medio de la herramienta GPS la ubicación en coordenadas proyección Costa Rica Lambert Norte.

Por medio de la herramienta Excel MS, se realizó una base de datos donde se desglosa la ubicación de cada una de estas zonas, la cual es de suma importancia para la elaboración del mapa geográfico, esto se muestra en el Cuadro 4.

*Cuadro 4. Localización de zonas vulnerables en ruta Sifón-La Abundancia.*

<b>Identificación de Zona</b>	<b>Coordenada Este</b>	<b>Coordenada Norte</b>	<b>Elevación m.s.n.m</b>	<b>Clasificación de Zona</b>
1	487469	256822	616	Deslizamiento
2	487469	256822	616	Deslizamiento
3	487351	255971	630	Intervenida
4	486752	255569	630	Deslizamiento
5	486083	254598	641	Vulnerable
6	486071	254491	645	Intervenida/Deslizamiento
7	486044	254088	668	Vulnerable
8	485979	253852	683	Deslizamiento
9	486047	253513	704	Deslizamiento
10	486277	253286	716	Deslizamiento
11	486543	252968	720	Intervenida
12	486543	252968	720	Deslizamiento
13	486577	252715	725	Deslizamiento
14	486577	252715	725	Intervenida/Deslizamiento
15	486523	252432	727	Intervenida
16	486523	252432	727	Intervenida
17	486124	251435	729	Deslizamiento
18	486124	251435	729	Deslizamiento
19	485380	251771	772	Vulnerable
20	485268	251421	769	Deslizamiento
21	485250	250978	788	Deslizamiento
22	485101	250085	833	Intervenida/ Deslizamiento
23	484880	249809	849	Deslizamiento
24	484753	249584	858	Intervenida/ Deslizamiento
25	484316	248755	916	Intervenida
26	484288	248477	927	Intervenida
27	484282	248316	934	Deslizamiento
28	484474	247864	936	Intervenida
29	484018	247103	966	Intervenida

<b>Identificación de Zona</b>	<b>Coordenada Este</b>	<b>Coordenada Norte</b>	<b>Elevación m.s.n.m</b>	<b>Clasificación de Zona</b>
30	484137	246652	946	Intervenida
31	484755	245225	896	Deslizamiento
32	484700	244856	913	Deslizamiento
33	484497	244736	925	Vulnerable
34	484426	244612	934	Deslizamiento
35	484345	244221	944	Deslizamiento
36	484683	243764	936	Deslizamiento
37	484683	243764	936	Deslizamiento
38	485074	242757	1004	Deslizamiento
39	485212	242735	-	Deslizamiento
40	484937	242460	984	Intervenida
41	484773	241974	1010	Deslizamiento
42	484968	241771	1010	Deslizamiento
43	484883	241141	999	Intervenida/ Deslizamiento
44	484704	241026	1042	Deslizamiento
45	484710	240145	1078	Intervenida/ Deslizamiento
46	484800	239922	1089	Intervenida
47	486086	238258	1168	Intervenida
48	486998	236283	1149	Intervenida/ Deslizamiento
49	487061	236232	1151	Intervenida/ Deslizamiento

En la sección Apéndice 2 se muestra el mapa elaborado por etapas, donde se incluye cada una de las zonas identificadas con su respectiva descripción y ubicación según coordenadas, esto para una mejor visualización.

Al identificar las zonas con deslizamiento y ubicarlas se realizó una evaluación de estos con respecto a la afectación de la vía, para determinar cuáles eran las zonas más críticas, que serían prioridad de estudio. En la sección de Apéndice 2, se muestra la matriz de afectación donde se muestra el grado de afectación con una escala del

uno al diez, siendo 1 el valor más bajo de afectación en la vía y diez el valor con mayor grado de afectación. A continuación, se muestra el Gráfico 1 con los parámetros de afectación determinados en las 49 zonas vulnerables identificadas.

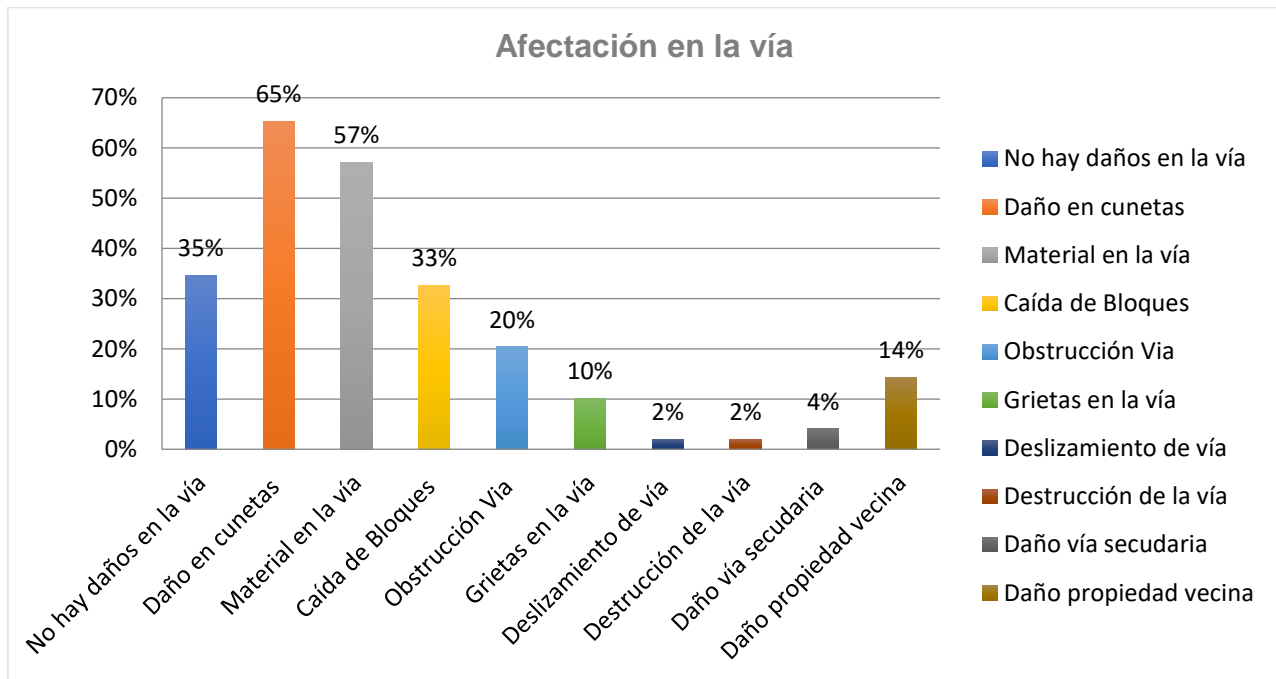


Gráfico 1 Afectación en la vía de zonas vulnerables identificadas en la totalidad del corredor vial.

Otro de los aspectos importantes, y fundamentales para la evaluación de los sectores, fue identificar los problemas que han causado y pueden aumentar la inestabilidad del terreno, el mecanismo impulsor del deslizamiento como tal que genera afectación de la vía. Al identificar las zonas con vulnerabilidad, se realizaron Cuadros con las propiedades físicas de todos los puntos localizados, observados en las visitas de inspección al campo, según factores específicos como: materiales de la zona, materiales desplazados, relieve, condición de humedad, sistemas de manejo de agua, problemáticas o mecanismos impulsores observados y la presencia de soluciones realizadas en sitio para evitar un deslizamiento como tal o estabilizar una zona ya afectada por el deslizamiento., estas Cuadros se pueden encontrar en la sección de Apéndice 3.

A continuación, se muestra en el Cuadro 5. (Resumen) con las características más relevantes encontradas comúnmente en la zona.

Cuadro 5. Factores identificados en inspección de sitio.

Factor	Descripción identificada
Vegetación	De media a baja, con presencia de pasto, arbustos y árboles.
Materiales	Arenosos y finos, sueltos, con presencia de bloques de roca.
Humedad	De húmeda a saturada, evidencia de agua en la superficie del suelo.
Relieve	Ondulado en algunos sectores, en su mayoría montañoso.
Sistemas drenaje	Inexistente o deficiente en su gran mayoría.

Dentro del estudio correspondiente, las visitas al sitio y el análisis de la información se obtuvieron como resultado la identificación de los factores

condicionantes y desencadenantes que promueven los deslizamientos en la zona, como se muestra en el Cuadro 6 y Cuadro 7.

*Cuadro 6. Factores condicionantes impulsores de inestabilidad en ruta 35: Sifón-La Abundancia.*

<b>Factores Condicionantes</b>	
<b>Condicionantes</b>	<b>Efectos</b>
Geometría y Relieve	Influye en el deslizamiento debido a que controla la distribución del peso del terreno, parámetros como la pendiente y la geometría de la zona como lo es la altura, aumentan la vulnerabilidad de la zona. El tipo de relieve es un factor que brinda las condiciones a la zona para que sea más propensa a un deslizamiento, ya que en terrenos montañosos la inestabilidad es mayor.
Geología Materiales	La composición del terreno, en sus diferentes estratos afecta la capacidad del terreno, ya que esta depende de las propiedades de densidad, resistencia y comportamiento hidrogeológico de los materiales. La presencia de materiales muy finos y sueltos promueve la inestabilidad al combinarse con factores desencadenantes.
Meteorización	La meteorización son los cambios físicos y químicos, que se dan por procesos externos los cuales provocan la alteración y disgregación de los materiales en contacto con la atmósfera, promueve la erosión externa e interna y esto genera zonas de debilidad que promueven el deslizamiento.
Deforestación	La deforestación es un factor que promueve la erosión y modificaciones en el balance hídrico, los cuales son factores desencadenantes, estos modifican tanto en la estructura externa como interna del terreno.

Cuadro 7. Factores desencadenantes impulsores de inestabilidad en ruta 35: Sifón-La Abundancia.

<b>Factores desencadenantes</b>	
Factores Desencadenantes	Efectos
Condición y Cambios hidrológicos	La saturación del suelo, la variación de las presiones intersticiales debido a las condiciones hidrológicas, por el contenido de humedad en la zona y por las condiciones climáticas, son factores que promueven cambios en el peso del terreno, la socavación y la erosión, así como la generación de grietas y planos de debilidad por las acciones climáticas.
Cargas / Peso propio gravedad	La aplicación de cargas ya sea estática o en movimiento generan un cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional del terreno, así como el incremento las presiones intersticiales. En este factor se considera la distribución del peso propio de la ladera o talud.
Cambios Morfológicos y de Geometría	Al existir un cambio en la geometría o morfología del suelo, se da una variación de las fuerzas debidas al peso, así como un cambio en el estado tensional que promueve el deslizamiento. En la zona existen fallas de diversas edades que al ser cortadas promueven los cambios tanto en la geometría como en la morfología de la zona.
Erosión	La erosión y socavación promueven los cambios geométricos en la ladera, cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. La erosión puede ser observada e incluye aparte de la meteorización el transporte del material hasta las zonas de acumulación, por eso se toma en consideración la socavación como parte de los materiales desplazados.
Alteración hidrotermal	Es un cambio químico que ocurre durante la interacción del fluido hidrotermal (fluido a altas temperaturas) y la roca, se presentan cambios químicos y mineralógicos de la roca, los cuales afectan las condiciones de la zona y generan cambios morfológicos e hidrológicos que a su vez generan la inestabilidad.
Acción antrópica	Las acciones del ser humano tienen consecuencias graves en los comportamientos de la naturaleza, ya que, al realizar algún cambio en la geometría, hidrología, peso o propiedades de los materiales, esto desencadena un deslizamiento.

Una vez identificados los factores que influyen en el comportamiento inestable de las zonas, ya sean factores condicionantes o desencadenantes, se puede observar la frecuencia con la que se presentan en las zonas más críticas, siendo esto un indicador de un factor en común que favorece la inestabilidad en la totalidad de la zona alrededor del corredor vial. Con ayuda del Cuadro 6 y el

Grafico 2 mostrado a continuación se puede observar los resultados en el Cuadro 8 de los factores con mayor presencia en las zonas. Para un total de 10 factores estudiados, 5 factores condicionantes y 5 factores desencadenantes, estudiados en 13 de las zonas más críticas, las cuales poseen mayor afectación en la vía, y problemática.

Cuadro 8. Identificación de factores impulsores en zonas críticas.

Zona	Mecanismo impulsor en zonas críticas									
	Pendiente Elevada >40%	Altura Corte	Geología Materiales	Meteorización	Deforestación	Saturación (Condición humedad)	Gravedad Peso Propio	Socavación	Hidrotermal	Erosión
17+400	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓
18+600	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓
19+800	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
20+050	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
21+050	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
21+640	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✓
29+100	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✓
30+700	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
31+100	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
33+800	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
34+770	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓
36+130	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
20+800	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓

\*Los factores anteriores se determinaron con la inspección a cada una de las zonas y la investigación de estudios previos antes realizados por la empresa Asesorías GEOTEC y D'GEO S.A.

**Simbología:**

- ✓ Existencia de factor en la zona de estudio.
- ✗ Inexistencia de factor en la zona de estudio.

A continuación, en el Grafico 2 se muestra los resultados del Cuadro 6, de manera visual para su posterior análisis.

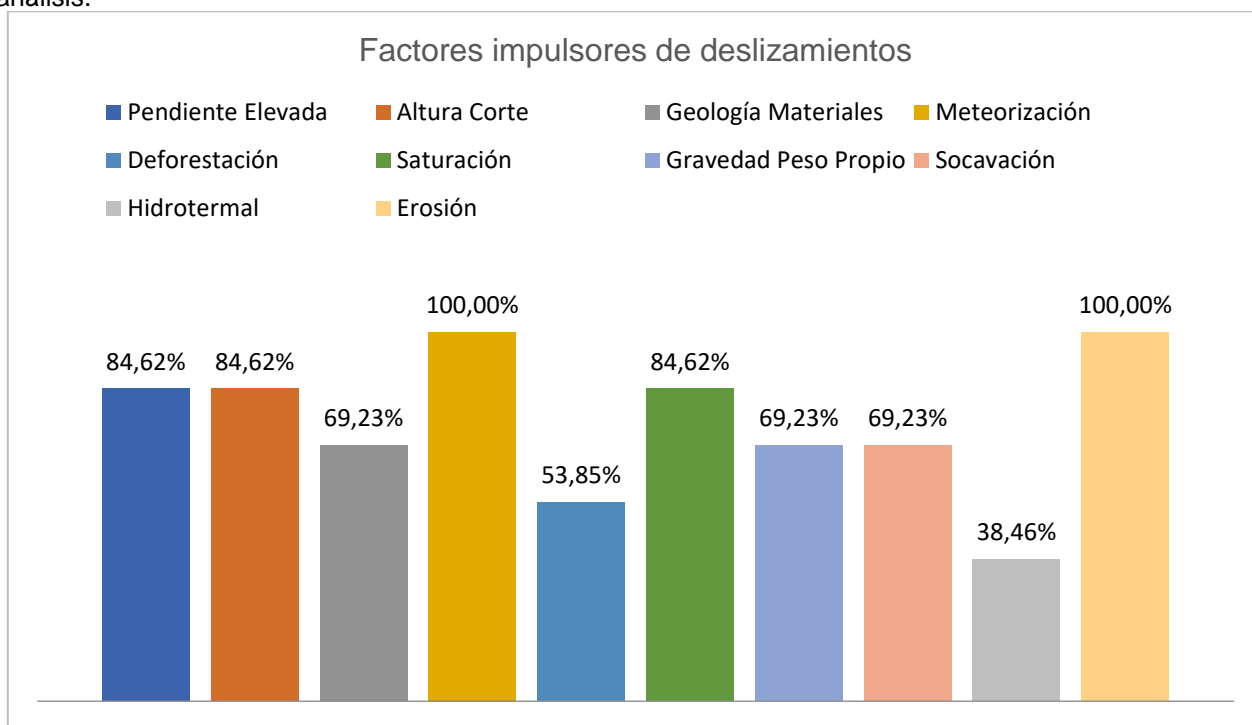


Gráfico 2 Factores impulsores de deslizamientos presentes en zonas críticas.

## Caracterización y Clasificación de Depósitos en Zonas Críticas

Se realizó una caracterización geológica y geotécnica de los materiales presentes en las zonas críticas, con el fin de identificar aquellos materiales que propician o favorecen el desplazamiento del terreno, con base en la identificación de dichas propiedades.

Las unidades geológicas fueron identificadas por Geólogos de la empresa Asesorías GEOTEC, quienes determinaron sus características y brindaron la descripción correspondiente de cada material

Una vez analizadas las unidades geológicas presentes en cada una de las zonas, se clasificó según la descripción, características físicas y propiedades de cada uno de los materiales.

Cabe destacar que en algunos de los casos la descripción hace énfasis a la matriz del material, que se encuentra en un mayor porcentaje, no se contaba con todos los análisis granulométricos de laboratorio o los límites de Atterberg, por lo tanto, con la descripción de los tamaños y el criterio experto se generaron los resultados anteriores.

Con lo anterior se obtuvo el Cuadro 9, resumen de las unidades geológicas presentes en las zonas estudiadas junto con la clasificación de los materiales según el tamaño de las partículas y los límites de Atterberg en la mayoría de los casos. De acuerdo con el contenido de gravas, arenas, limos o arcillas se asignó la simbología según la clasificación SUCS, la descripción y el criterio experto, con el objetivo de identificar un factor común, presente en las zonas estudiadas.

Cuadro 9. Materiales geológicos, granulométricos y límites de Atterberg presentes en zonas críticas.

UNIDADES GEOLÓGICAS PRESENTES EN ZONAS CRÍTICAS												
17+400	18+600	19+800	20+050	20+800	21+050	21+640	29+100	30+700	31+100	33+800	34+770	36+130
Toba ceniza SM-MH	Toba pumítica SM	Toba ceniza SM-MH	Toba ceniza SM-MH	Tobas SC-SM	Coluvio SP-SC	Brecha SP-SM	Depósito hidrotermal SC-SM	Toba cinerítica MH	Lavas andesito basálticas SW	Brecha Volcánica GW	Brechas SM	Ceniza no consolidada SC-SM
Toba pumítica SM	Toba lapillica SM	Facies brecha media SM-MH	Facies brecha media SM-MH	Brechas SW-SM	Flujo de detritos SP-SC	Tobita SM	Toba soldada SM	Toba lapillica MH	Lavas SM	Brecha volc hidrotermal SW	Brecha lávica alterada SM	Toba brechosa SM/SL
Toba lapilli consolidada SM-MH	Toba ceniza SC-SM	Facies Brecha arcillosa SM-MH	Facies Brecha arcillosa SM-MH	Tobitas SM	Tobas SC-SM	Ignimbrita SM	Toba pumítica SW-SM	Autobrecha de lava SM	Tobas pumíticas de flujo SM	Tobita GP	Tobas varicolores SC-SM/ MH	Lavas blocosas SW
Toba compacta SM	Toba brechosa SM	Facies Brecha gruesa SM-MH	Facies Brecha gruesa SM-MH	Ignimbrita SM	Colada de lava GP		Toba de ceniza SM-MH	Lava blocosa SW	Tobas pumíticas de flujo rosadas SP-SM	Paleoaluvión GP	Aluvión GP	Facies flujo de cenizas SC-SM
Depósito deslizados MH	Toba pumítica inferior SM-MH	Depósitos deslizado SM-MH	Depósito deslizado SM-MH	Coluvio MH	Brechas GW		Tobas líticas SC-SM	Tobas SC/ SM-MH	Tobas SC-SM	Lavas basálticas SW	Toba pumítica SM	Facies flujo pumítico SM
	Conglomerado SW			Flujo de lodo SM	Tobas SM/SP		Tobas SM / GP	Flujos de lodo SC/ SM-MH	Brechas SP-SM		Depósito deslizado MH	Depósito deslizado MH
	Lavas SP			Aluviones SM	Aluvion GP			Paleosuelo quemado SM				
	Depósito hidrotermal SC-SM			Deposito Deslizado MH	Toba pumítica de flujo SM							
	Brecha basal SP				Ignimbrita SM							

Nota: \*

\*La clasificación mostrada en el Cuadro anterior se realizó con base en la descripción brindada por los geólogos, y por el análisis granulométrico de algunos materiales, así como de los límites de Atterberg no obstante, cabe resaltar que algunas de las granulometrías corresponden a la matriz del material y no a una unidad muestra representativa de toda la unidad.

\*No se contaba en algunos casos con la información completa de ensayos en laboratorio, solamente con descripción del material y fotografías de muestras.

Limites de Atterberg para materiales por estación.																				
17+400			18+600			19+800			20+050			20+800			21+050			21+640		
LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
Toba ceniza			Toba pumítica			Toba de ceniza			Toba de ceniza			Tobas			Coluvio			Brecha		
92	47	45	71	44	27	72	62	10	72	62	10	63	43	20	-	-	-	60	40	20
Toba pumítica			Toba lapillica			Facies brecha media			Facies brecha media			Brechas			Flujo de detritos			Unidad Tobita		
-	-	-	54	30	24	53	47	6	53	47	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Toba lapilli consolidada			Toba de ceniza			Facies Brecha arcillosa			Facies Brecha arcillosa			Unidad Tobitas			Tobas			Unidad Ignimbrita		
-	-	-	53	30	23	59	39	20	59	39	20	-	-	-	56	31	25	-	-	-
Toba Compacta			Toba brechosa			Facies Brecha gruesa			Facies Brecha gruesa			Toba pumítica			Colada de lava					
-	-	-	49	30	19	53	47	6	53	47	6	NP	NP	NP	NP	NP	NP			
Depositos			Toba pumítica			Depositos deslizado			Depositos deslizado			Ignimbrita			Brechas					
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
			Conglomerado									Unidad coluvio			Tobas y aluviones					
			-									-			53 43 10					
			Lavas									Depositos deslizados			Toba pumítica de flujo					
			-									60 34 26			56 31 25					
			Depositos hidroterma									Flujo de lodo			Ignimbrita					
			-									-			-					
			Brecha basal									Aluviones								
			-									-								

\*No se contaba en algunos casos con la información completa de ensayos en laboratorio, solamente con descripción del material y fotografías de muestras. Informes D'Geo S.A y Asesorias Geotec S.A.

Limites de Atterberg para materiales por estación.																	
29+100			30+700			31+100			33+800			34+770			36+130		
LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
Alteración hidrotermal			Toba cinerítica			Lavas andesito basálticas			Brecha Volcanica			Brecha			Ceniza no consolidada		
60	38	22	79	62	17	-	-	-	-	-	-	61	48	13	69	60	9
Toba soldada			Toba lapilica			Lavas			Brecha volcanica alteración hidrotermal			Brecha lavica alterada			Toba brechosa		
86	54	32	71	55	16	-	-	-	64	40	24	60	54	6	58	52	6
Toba pumítica			Autobrecha de lava			Tobas pumíticas gris de flujo			Tobita			Tobas varicolores			Lavas blocosas		
60	40	20	-	-	-	NP	NP	NP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Toba de ceniza			Lava blocosa			Tobas pumíticas de flujo rosadas			Paleoaluvión			Aluvion			Facies flujo de cenizas		
82	57	25	-	-	-	NP	NP	NP	-	-	-	-	-	-			
Tobas líticas			Flujos de lodo			Brechas			Lavas basalticas			Toba pumítica			Facies flujo pumítico		
87	51	36	-	-	-	NP	NP	NP	-	-	-	-	-	-	56	42	14
Tobas			Depositos Deslizados			Paleosuelo quemado						Depositos			Depositos deslizados		
-	-	-	-	-	-	59	51	8				65	45	20	69	58	11
			Toba pumítica rosada meteorizada			Toba Superior											
			58	45	13	NP	NP	NP									
			Toba pumítica rosada														
			NP	NP	NP												
			Paleosuelo quemado														
			59	51	8												

\*No se contaba en algunos casos con la información completa de ensayos en laboratorio, solamente con descripción del material y fotografías de muestras. Informes D'Geo S.A y Asesorias Geotec S.A.

Para observar de mejor forma los materiales comunes por estación, o por zona estudiada se realizó una matriz de los materiales geológicos, donde se pueda identificar cuales están

presentes en la mayoría de las zonas estudiadas, la matriz es llamada “Materiales geológicos presentes en zonas críticas” y se muestra a continuación en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Materiales geológicos presentes en zonas críticas. Ruta 35 Sifón-La Abundancia.

Materiales geológicos presentes en zonas críticas	
Estación	Toba Ceniza Toba Cinerítica Flujo Ceniza Toba Pumítica Toba Pumítica Inferior Toba Pumítica Flujo rosada Toba Pumítica Flujo Flujo Pumítico Toba Lapillica Toba lapilli Consolidada Toba Compacta Toba Soldada Ignimbrita Toba Brechosa Toba Toba Varicolores Tobita Tobas Líticas Brechas Brecha Volcanica Brecha lavica Alterada Auto Brecha de Lava Brecha Media Brecha Arcillosa Brecha Gruesa Brecha Basal Aluvion Lava Lava Basáltica Lava Blocosa Coluvio Flujo de Detritos Ceniza no consolidada Paleoaluvión Hidrotermal Flujo de Lodo Conglomerado
17+400	✓
18+600	✓
19+800	✓
20+050	✓
20+800	✓
21+050	✓
21+640	✓
29+100	✓
30+700	✓
31+100	✓
33+800	✓
34+770	✓
36+130	✓

Nota: \*

\* Se realiza la matriz de materiales geológicos presentes en las zonas críticas, con el fin de determinar sus predominancias en el trazado, ya que los deslizamientos se ubican en diferentes estacionamientos.

De igual forma se elaboró una matriz según la clasificación SUCS que unificara las unidades, y permitiera identificar el tipo de material ya sea: grava, arena o fino, y cuáles de estos tienen mayor participación o presencia en la zona, con el objetivo

también de analizar las características geo-mecánicas y encontrar una relación entre los materiales y los deslizamientos. Los resultados se muestran en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Características granulométricas presentes en zonas críticas. Ruta 35 Sifón-La Abundancia.

Características granulométricas presentes en zonas críticas												
Estación	Limo Alta Plasticidad	Arena bien graduada	Arena mal graduada	Arena con limos	Arena con arcillas	Arena limosa limos alta plasticidad	Arena con arcillas y limos	Arena mal graduada con arcillas	Arena mal graduada con limos	Arena bien graduada con limos	Grava bien graduada	Grava mal graduada
	MH	SW	SP	SM	SC	SM-MH	SC-SM	SP-SC	SP-SM	SW-SM	GW	GP
17+400	✓			✓		✓						
18+600		✓	✓	✓		✓	✓					
19+800						✓						
20+050						✓						
20+800	✓			✓			✓			✓		✓
21+050			✓	✓			✓	✓			✓	✓
21+640				✓					✓			
29+100				✓		✓	✓			✓		✓
30+700	✓	✓		✓	✓	✓	✓					
31+100		✓		✓			✓		✓			
33+800		✓									✓	✓
34+770	✓			✓			✓					✓
36+130	✓	✓		✓			✓					

\* Se realiza la matriz de caracterización granulométrica de los materiales presentes en las zonas críticas, con el fin de determinar un factor común que se pueda relacionar a la contribución de estos en la inestabilidad o vulnerabilidad a deslizamiento de las zonas.

Obteniendo de esta manera, con una relación entre las dos matrices anteriores los materiales con mayor presencia en las zonas críticas estudiadas, caracterizados por el tamaño de partícula, seguido de la unidad geológica y con

sus respectivas características geo-mecánicas. Los resultados se muestran en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Materiales con mayor presencia en zonas críticas y sus características geo-mecánicas.

Materiales con mayor presencia en zonas críticas					
Material	Unidad Geológica	Estación	Parámetros		
			Cohesión KN/m <sup>2</sup>	Fricción	Peso Unitario kN/m <sup>3</sup>
Arena con limos (SM)	Toba pumitica	17+400	20	23°	16,2
		18+600	74	12°	17,0
		29+100	86	14°	17,0
		34+770	19	25°	16,0
	Ignimbrita	20+800	80	18°	19,0
		21+050	29	30°	25,0
		21+640	49	30°	23,0
	Brecha	20+800	40	18°	16,0
		21+640	29	20°	19,0
		31+100	14	27°	13,0
		34+770	44	35°	22,0
	Arena limosa con limos de alta plasticidad (SM-MH)	Toba ceniza	17+400	10	23°
19+800			5	28°	16,0
20+050			5	28°	16,0
29+100			10	22°	18,0
Arena con arcillas y limos (SC-SM)	Tobas	20+800	20	18°	14,5
		21+050	98	28°	21,0
		31+100	67	0°	9,8

Nota: \*

\*Las a propiedades geo-mecánicas, como lo es la cohesión, fricción y peso unitario; son obtenidos de informes elaborados por diferentes empresas para materiales extraídos de las zonas en estudio, por medio de ensayos de corte directo o triaxial, y por la correlación entre la compresión no confinada y la resistencia al corte.

Una vez concluida la etapa de caracterización y clasificación de los materiales geológica y geotécnicamente, se procede a la clasificación de cada una de las zonas, en conjunto con la determinación de los factores impulsores de deslizamientos e inestabilidad y las características

más relevantes encontradas de los materiales presentes en la zona, con lo que se obtiene una matriz descriptiva de las principales características de las zonas y una matriz de clasificación, que se muestra en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Matriz de problemáticas, afectación y soluciones presentes en zonas críticas estudiadas.

Zona	Evidencia del problema estudiado y en campo	Posibles Causas				Impacto directo en la vía				Soluciones implementadas
		Materiales	Geometría	Saturación	erosión	No se identifica una posible afectación	Se puede presentar una afectación en la vía si no hay una rápida intervención	Alta posibilidad de afectación en el corto plazo	Existe una afectación en la vía	
17+400	Evidencia de movimientos de material, con una altura variable, con una pendiente muy elevada. Evidencia de erosión y meteorización en los materiales.		X	X			X			Bermas de alivio
18+600	Gran altura del talud presenta desprendimientos de materiales. Los depósitos encontrados son volcanoclasticos, heterogéneos, principalmente brechas, lavas y tobas.		X	X			X			Bermas de alivio
19+800	Corte generado para la construcción de la carretera, pendiente alta, las condiciones hidrogeológicas afectan las unidades geotécnicas blandas. Existen fallas cerca de la zona. En el pie de esta zona existe una grieta de tracción que se curva y corta la carretera. Posee un escarpe evidenciando problemas de movimiento en el área de escombrera que se encuentra frente.		X	X	X				X	Bermas de alivio, cunetas para manejo de aguas
20+050	Corte generado, pendiente alta, las condiciones hidrogeológicas afectan las unidades geotécnicas blandas. Existen fallas cerca de la zona. En el pie de esta zona existe una grieta de tracción que se curva y corta la carretera. Posee un escarpe evidenciando problemas de movimiento en el área de escombrera que se encuentra frente.		X	X	X				X	Bermas de alivio, cunetas para manejo de aguas

Zona	Evidencia del problema estudiado y en campo	Posibles Causas				Impacto directo en la vía				Soluciones implementadas
		Materiales	Geometría	saturación	erosión	No se identifica una posible afectación	Se puede presentar una afectación en la vía si no hay una rápida intervención	Alta posibilidad de afectación en el corto plazo	Existe una afectación en la vía	
20+800	zona inestable con presencia de deslizamientos antiguos, la precipitación es fundamental en este deslizamiento ya que en la época tuvo un pico de lluvia, el terreno presenta estratos con características de soporte deficientes, suelos con una consistencia blanda o densidad suelta, socavación del material en la zona.	X	X	X	X				X	Geometría de talud
21+050	Posibles fallas paleo tectónicas, alteración hidrotermal que afectan las condiciones geo-mecánicas, influencia de la gravedad, pendiente que se considera alta. La precipitación, la infiltración del agua, la escorrentía superficial y la poca competencia del terreno hacen que el movimiento del material sea continuo y difícil de delimitar. Vegetación prácticamente nula. Presencia de grietas cerca de Tobitas y brechas (que están asociadas a un material de bajas condiciones geo-mecánicas). Se generan problemas por la escombrera al frente del talud y no necesariamente por el corte del talud.	X	X	X	X			X		Bermas de alivio, cunetas para manejo de aguas
21+640	Se evidencia un deslizamiento de considerables dimensiones, así como la presencia de focos de inestabilidad dispersos a lo largo de esta zona, la altura en esta zona no es extremadamente grande, ronda entre 15 a 20 m y tiene una pendiente elevada.		X	X	X		X			Cunetas para manejo de agua

Zona	Evidencia del problema estudiado y en campo	Posibles Causas				Impacto directo en la vía				Soluciones implementadas
		Materiales	Geometría	Mal o inexistente manejo de aguas	erosión	No se identifica una posible afectación	Se puede presentar una afectación en la vía si no hay una rápida intervención	Alta posibilidad de afectación en el corto plazo	Existe afectación en la vía	
29+100	Conformación de taludes, la presencia de material orgánico en algunas áreas afecta debido a su alta compresibilidad y baja resistencia al corte. El deslizamiento presentado en esta zona que tienen varios años de estar activo. Presenta susceptibilidad a la acción del agua.	X	X	X	X				X	Geometría de talud y cunetas de concreto
30+700	Pendiente fuerte, posee problemas de erosión de la ladera, se realizaron taludes, movimientos de tierra con brotes de agua, movimiento flujo de barro. La litología se conforma de lavas, tobas y brechas. La altura entre la carretera y las grietas es considerada como elevada. La alta pluviosidad en la zona promueve la infiltración del agua, que se presenta como salidas en la cara del talud y erosión de los depósitos blandos. Presenta problemas de hidrotermalismo.		X	X	X			X		Bermas de alivio
31+100	Presenta una fuerte pendiente, es un corte generado para la construcción de la carretera, con presencia de rocas volcánicas como tobas y brechas, que están afectadas por dos fallas. Altura bastante elevada. (100m). Factores como la precipitación e infiltración del agua, escorrentía superficial y la reptación presente en el terreno promueven el movimiento del material de una manera prácticamente continua. Debido a la composición de la matriz de las tobas que cubren y envuelven lavas blocosas se presenta la erosión de los suelos.		X	X	X		X			Bermas de alivio

Zona	Evidencia del problema estudiado y en campo	Posibles Causas				Impacto directo en la vía				Soluciones implementadas
		Materiales	Geometría	Mal o inexistente manejo de aguas	erosión	No se identifica una posible afectación	Se puede presentar una afectación en la vía si no hay una rápida intervención	Alta posibilidad de afectación en el corto plazo	Existe una afectación en la vía	
33+800	Deslizamiento de considerables dimensiones, presenta focos de inestabilidad a lo largo de la zona, tiene una altura variable con una pendiente elevada. Muestra un contexto, conformado por brechas con niveles de influencia aluvial. La presencia de fallas cercanas puede afectar la estabilidad del talud, ya que es evidente la activación del movimiento en la actualidad.		X	X	X			X		Bermas de alivio, cunetas para manejo de aguas
34+770	Fallas paleo tectónicas, se muestran deslizamientos y remoción de masas relacionados a posible alteración hidrotermal, que a su vez afectan las condiciones geo-mecánicas. Las precipitaciones y la escorrentía juegan un papel fundamental en el desarrollo de estos deslizamientos, al formarse surcos y cárcavas.	X		X	X			X		Bermas de alivio, cunetas para manejo de aguas
36+130	Corte generado para la construcción de la carretera, el cual presenta un deslizamiento, existe una micro-cuenca de pendiente media a baja, la cual evidencia fuertes agrietamientos y por lo tanto el movimiento de la masa hacia la carretera. La elevación máxima es de aproximadamente 33 m.		X		X				X	Bermas de alivio

Como objetivo de esta segunda etapa se realiza una clasificación de la inestabilidad de las zonas críticas, considerando diferentes factores, dichos factores en la matriz fueron registrados en campo por medio de la inspección realizada, y analizada posteriormente por medio de fotografías para obtener la información de la manera más precisa, de acuerdo con las diferentes características de los sitios. Para cada una de las zonas críticas se determinó los factores influyentes o causante del

deslizamiento o de la inestabilidad, por medio de la recopilación y el análisis de la información previamente obtenida por estudios realizados por la empresa Asesorías GEOTEC S.A. y D'GEO. Una vez determinados los factores, se realizó una matriz para evaluar la similitud de los mecanismos impulsores, y determinar la inestabilidad de las zonas, asignándole una escala a cada uno de estos factores, la cual se muestra a continuación.

Cuadro 14. Escala para clasificación global de inestabilidad.

<b>Escala factor global</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Inestabilidad</b>		
Clasificación	Moderadamente Estable	Inestable	Alta inestabilidad
Escala	Escala (0 a 10)	Escala (10 a 15)	Escala (15 a 30)
Color			

Cuadro 15. Escala de factores condicionantes para clasificación de inestabilidad.

<b>Escala factor condicionantes</b>									
<b>Pendiente</b>		<b>Geometría/Altura</b>		<b>Litología/Materiales</b>		<b>Meteorización</b>		<b>Deforestación</b>	
<b>Escala (0 a 3)</b>		<b>Escala (0 a 3)</b>		<b>Escala (0 a 3)</b>		<b>Escala (0 a 3)</b>		<b>Escala (0 a 3)</b>	
0	<10	0	< 5m	0	Material duro	0	nula	0	alta vegetación
1	10 a 20	1	5m a 15 m	1	Material firme	1	baja	1	media vegetación
2	20 a 40	2	15m a 40 m	2	Material medio/arenoso	2	media	2	poca vegetación
3	> 40	3	> 45 m	3	Material suave/suelto	3	alta	3	No hay vegetación

Cuadro 16. Escala de factores desencadenantes para clasificación de inestabilidad.

<b>Escala factores desencadenantes</b>									
<b>Condición hidrogeológica</b>		<b>Peso por gravedad en volumen</b>		<b>Socavación</b>		<b>Alteración hidrotermal</b>		<b>Erosión</b>	
<b>Escala (0 a 3)</b>		<b>Escala (0 a 3)</b>		<b>Escala (0 a 3)</b>		<b>Escala (0 a 3)</b>		<b>Escala (0 a 3)</b>	
0	Seco	0	muy pequeña 500 a 5000 m <sup>3</sup>	0	Nula	0	Nulo	0	No hay erosión
1	Húmedo	1	pequeña 5000 a 50000 m <sup>3</sup>	1	Baja	1	Iniciando	1	Baja
2	Saturado	2	mediana 50000 a 250000 m <sup>3</sup>	2	Media	2	Intermedio	2	Media
3	Flujo de agua	3	grande 250000 a 1000000 m <sup>3</sup>	3	Alta	3	Desarrollado	3	Alta

A continuación en el Cuadro 17, se muestra la matriz de afectación en la vía por parte de las zonas críticas, con una escala representativa para cada uno de los factores según la incidencia de estos en el deslizamiento, de manera que cuando exista una alta afectación la casilla se vuelve roja, y si la afectación es nula verde, los colores

intermedios (amarillos) pertenecen a una afectación intermedia. Con esto se identifican las zonas más críticas, que requieren una rápida intervención, acciones correctivas y planteamiento de sistemas de monitoreo para prevenir mayores afectaciones en la vía.

Cuadro 17. Matriz de clasificación de inestabilidad de zonas críticas.

FACTORES IMPULSORES DE INESTABILIDAD												
Estación	Factores Condicionantes					Factores Desencadenantes					TOTAL	Clasificación
	Pendiente	Altura Corte	Litología	Meteorización	Deforestación	Condición hidrológica	Peso propio (volumen)	Socavación	Hidrotermal	Erosión	Inestabilidad	
17+400	3	3	2	2	2	1	2	0	0	2	9	Moderadamente Estable
18+600	3	3	2	2	2	1	0	0	0	2	7	Moderadamente Estable
19+800	3	3	3	2	1	2	2	1	2	2	12	Inestable
20+050	3	3	3	2	1	2	2	1	2	2	12	Inestable
20+800	3	2	3	3	1	3	3	3	0	3	16	Alta inestabilidad
21+050	3	2	2	2	0	2	0	0	3	2	9	Moderadamente Estable
21+640	3	1	2	2	1	1	0	2	0	2	8	Moderadamente Estable
29+100	2	2	3	2	2	1	2	1	0	3	11	Inestable
30+700	2	2	3	3	3	3	2	1	3	3	18	Alta inestabilidad
31+100	3	3	2	1	3	2	0	1	0	1	8	Moderadamente Estable
33+800	3	2	2	2	0	1	1	1	0	1	6	Moderadamente Estable
34+770	3	2	2	1	1	2	1	3	1	2	11	Inestable
36+130	3	2	3	3	1	3	2	3	0	3	15	Alta inestabilidad

# Análisis Geotécnico de zonas críticas con necesidad de rápida intervención:

## Análisis geotécnico de zona 30+700

Se realizó el análisis de la zona número 30+700, estudiada previamente por la empresa Asesorías GEOTEC S.A., la cual brinda la información necesaria para realizar el análisis correspondiente, estas zonas pertenecen a la serie de 13 zonas estudiadas previamente en la sección anterior.

La elección de dicha zona se realiza con base en la clasificación elaborada en la sección anterior, representada por la matriz de clasificación de inestabilidad, donde las zonas elegidas presentan una alta inestabilidad, siendo estas las más críticas. El análisis correspondiente se realiza por medio de la recopilación de información, y el análisis por medio de los programas Slide y Phase 2 de Rocscience. Se utiliza el método de Mohr Coulomb debido a que los materiales presentes en su mayoría son suelos, lo que representa macizos rocosos blandos, debido a la alteración de la roca.

A continuación, se muestran fotografías de las condiciones de la zona crítica, ubicada en el kilómetro 30+700.



Figura 19. Deslizamiento en estacionamiento 30+700. Asesorías Geotec S.A. (2015).



Figura 20. Imagen aérea, inestabilidad en estación km 30+700. Asesorías Geotec S.A. 2017.



Figura 21. Evidencia de flujos de agua. Asesorías Geotec S.A. 2017.



Figura 22. Deslizamiento estacionamiento 30+700 km. Asesorías Geotec S.A. 2018.

## Clasificación de los estratos

Con el análisis previo realizado, según los estudios realizados por las empresas D'GEO S.A. y Asesorías GEOTEC S.A., de la clasificación del suelo en la zona 20+800, la investigación y comparación de dicha clasificación y con un

análisis ingenieril de las perforaciones realizadas, se determinó los estratos que componen la litología del sitio, con dicha información se realizó el Cuadro 18, el Cuadro 19 y el Cuadro 20 de características y propiedades de cada una de las unidades geotécnicas.

*Cuadro 18. Unidades geotécnicas y propiedades presentes en la zona de estudio, estación 30+700.*

<b>ESTACIÓN 30+700</b>				
Unidad Geotécnica	Descripción	cohesión (KPa)	Fricción (°)	Peso Unitario Seco KN/m <sup>3</sup>
1	Depósitos deslizados	0	22°	15
2	Flujos de Lodo	7	15°	14
3	Toba ceniza	7	20°	15
4	Toba Lapílica	8	27°	15
5	Lava Blocosa	98	15°	22
6	Toba pumítica rosada	40	30°	17
7	Toba pumítica rosada meteorizada	9	30°	15
8	Auto brecha de lava	1	35°	20

\*Las unidades geotécnicas y sus propiedades se obtienen de los análisis y ensayos realizados por la empresa Asesorías GEOTEC S.A. Haciendo uso de los ensayos de compresión no confinada y de la resistencia al corte, y su correlación.

*Cuadro 1 Clasificación SUCS y límites de Atterberg, estación 30+700.*

<b>ESTACIÓN 30+700</b>				
Unidad Geotécnica	SUCS	Limite Liquido	Limite Plástico	Índice Plasticidad
1	MH	70-69	51-50	19
2	MH	73	61	12
3	MH	79-72	62-60	12-17
4	MH	60-71	45-55	9-16
5	-	-	-	-
6	MH	NP	NP	NP
7	MH	58	45	13
8	MH	59	51	8

\*Los resultados se obtienen de los ensayos realizados por la empresa Asesorías GEOTEC S.A. a las muestras obtenidas en campo.

*Cuadro 2 Unidades geotécnicas y propiedades presentes en la zona de estudio, estación 30+700.*

<b>ESTACIÓN 30+700</b>				
Unidad Geotécnica	NSPT	Radio de Poisson	Material	Modulo Young (kPa)
1	2	0,43	Plástico	5000
2	7	0,40	Plástico	7000
3	2	0,45	Plástico	18000
4	28	0,32	Plástico	55000
5	30	0,31	Plástico	61000
6	50	0,28	Plástico	173000
7	34	0,32	Plástico	85000
8	25	0,31	Plástico	65000

\*El radio de poisson y el módulo de Young fueron obtenidos por correlación según Braja M. Das. (2007).

## Modelo Geotécnico

El modelo geotécnico, se realizó a partir del modelo geológico ya definido por la empresa Asesorías GEOTEC S.A. Para el posterior análisis geotécnico de las secciones del talud más representativas, esto por medio del software Slide y phase2.

Se realizaron tres perfiles diferentes para un mejor análisis, perfil A1-A1', A2-A2' Y A3-A3'. En la figura 23 se pueden observar la ubicación de los perfiles sobre la topografía de la zona estudiada, estos perfiles son representativos de las condiciones reales y la variación de la topografía en la zona de un punto a otro.

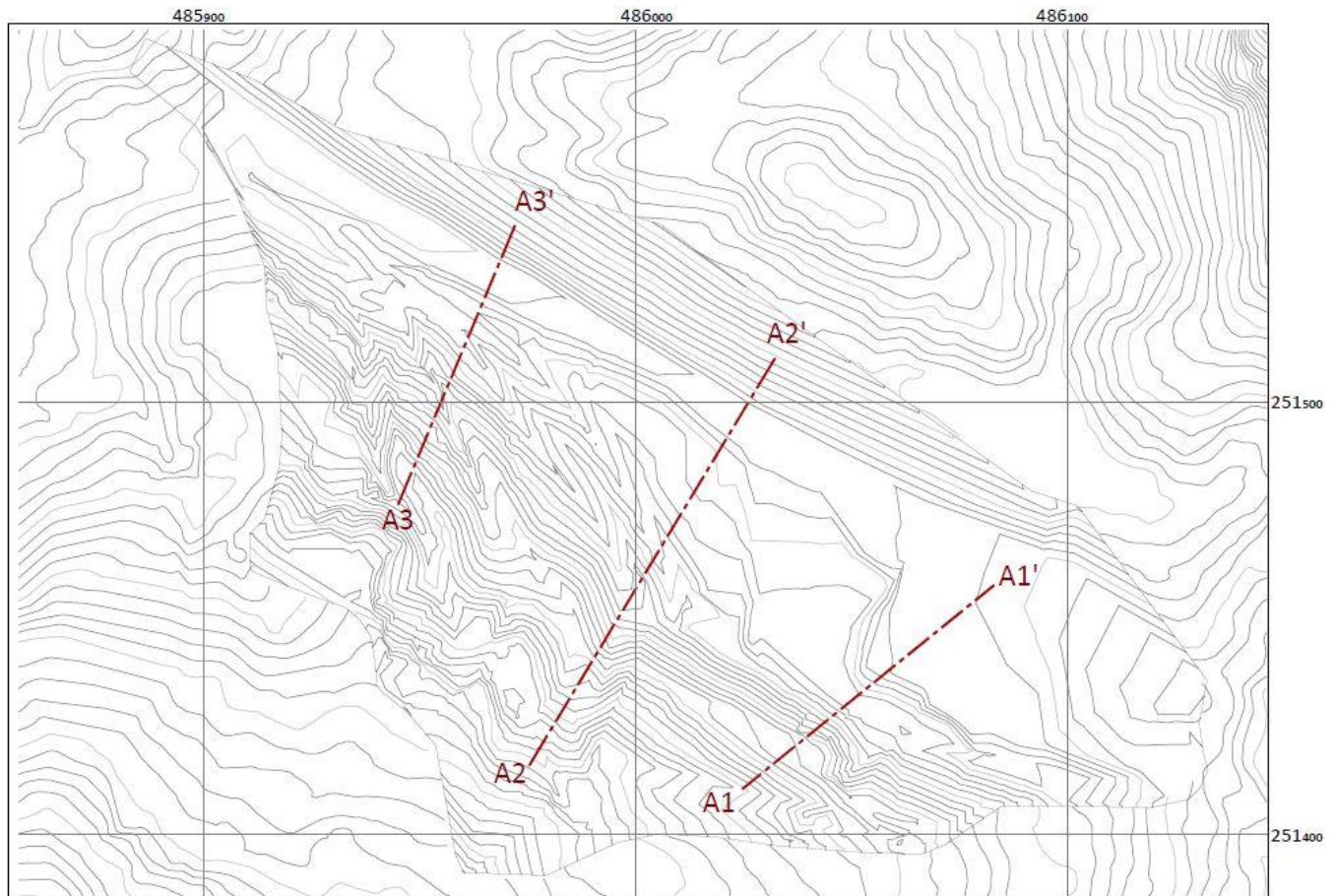


Figura 23. Ubicación de perfiles para zona crítica ene estación 30+700. Fuente: Elaboración propia.

Se muestran a continuación las figuras 24,25 y 26 en donde se observa el detalle de la disposición de las unidades geotécnicas en cada uno de los perfiles a analizar.

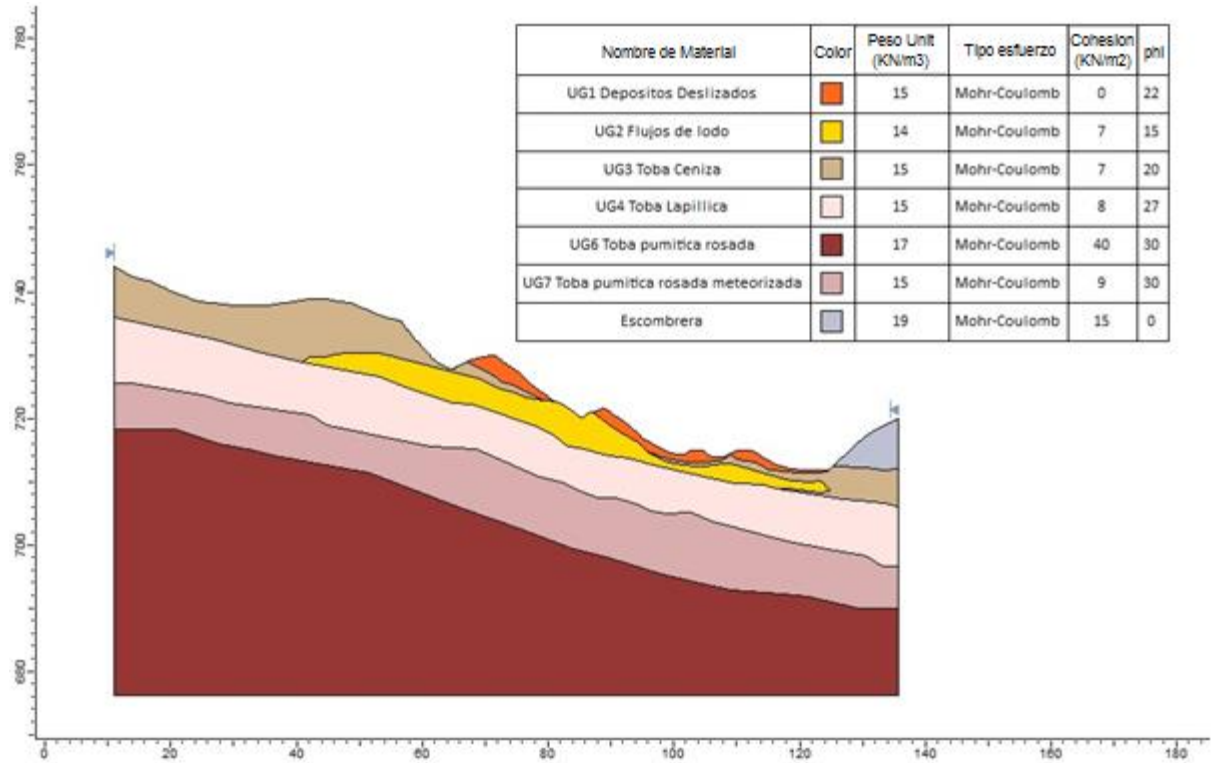


Figura 24. Perfil Geotécnico A1-A1'. Fuente: Elaboración propia.

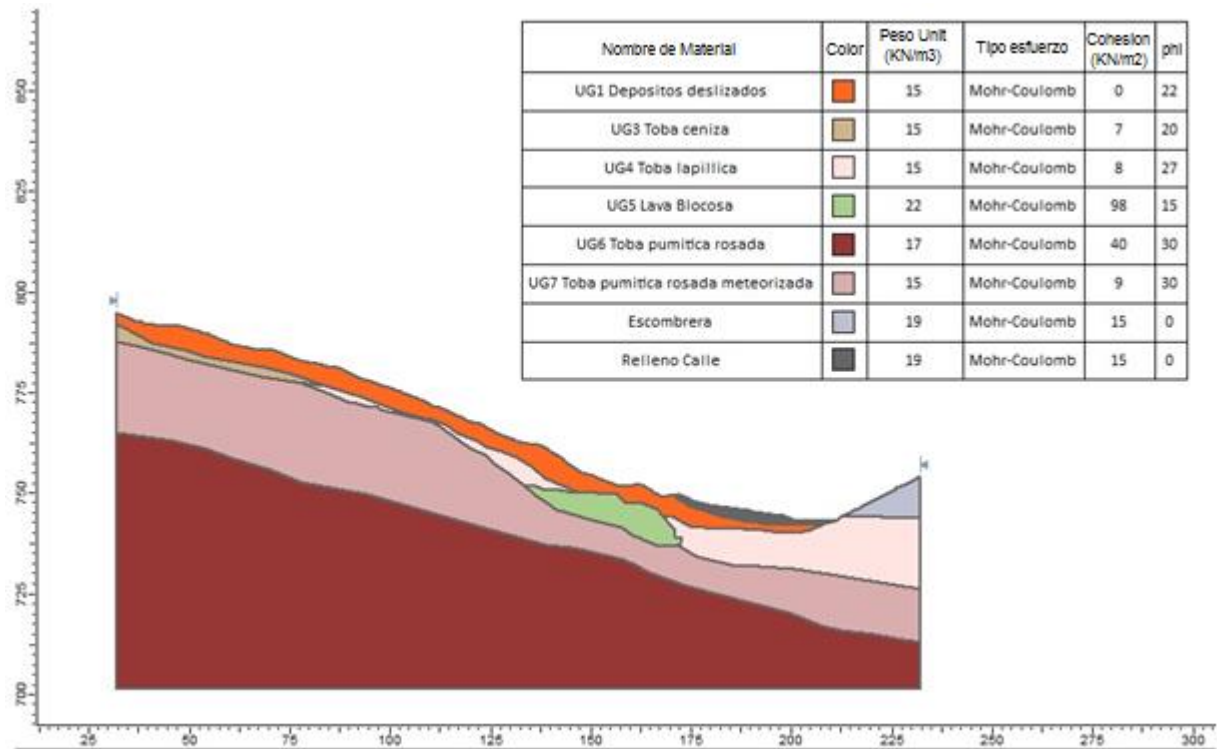


Figura 25. Perfil Geotécnico A2-A2'. Fuente: Elaboración propia.

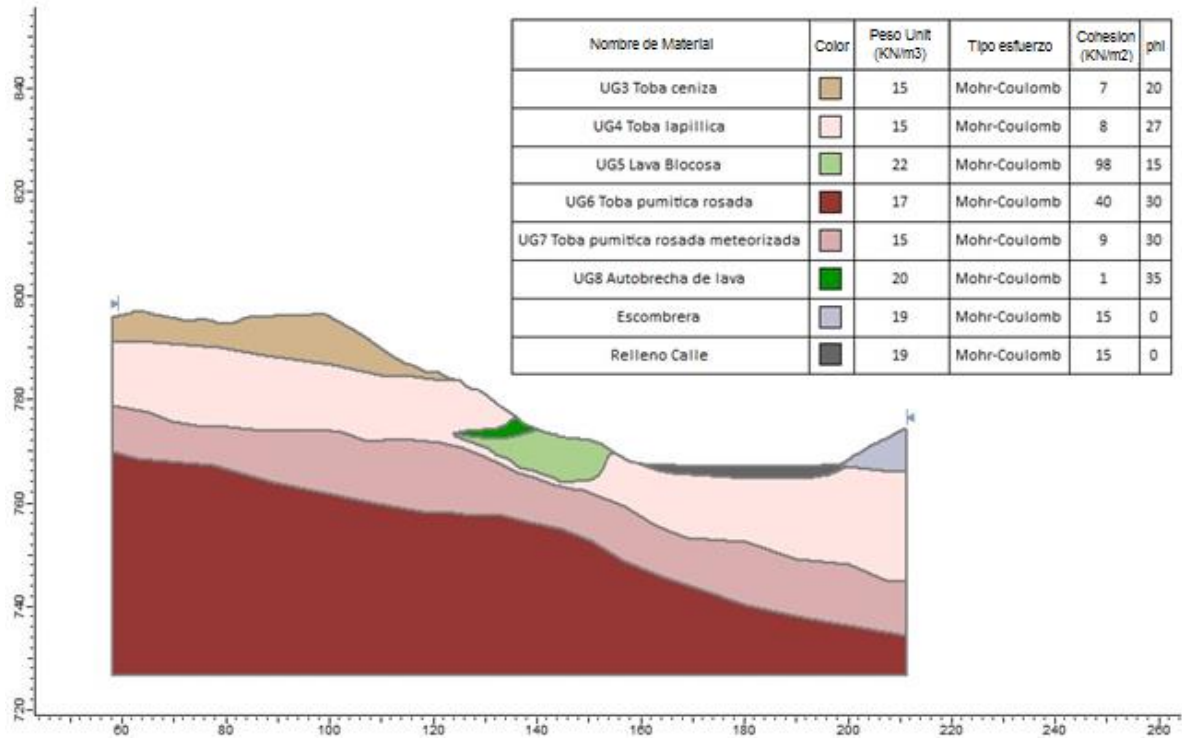


Figura 26. Perfil Geotécnico A3-A3'. Fuente: Elaboración propia.

### Análisis de estabilidad por Slide

Se presenta en el Cuadro 21 el factor de seguridad obtenido del análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite, en cada uno de los perfiles geotécnicos realizados para condición

estática y pseudo-estática. Estos análisis se realizaron por medio del programa Slide de Rocscience.

Cuadro 3 Resultado de análisis de estabilidad por medio de factor de seguridad (FS).

Factor de Seguridad condiciones naturales			
Perfil	Tipo de Análisis	F. S obtenido	F.S permisible
A1-A1'	Global Estático	1,008	1,50
	Global Pseudo-estático	0,652	1,10
	Local Estático	0,768	1,50
	Local Pseudo-estático	0,548	1,10
A2-A2'	Global Estático	0,972	1,50
	Global Pseudo-estático	0,619	1,10
	Local Estático	0,811	1,50
	Local Pseudo-estático	0,535	1,10
A3-A3'	Global Estático	1,721	1,50
	Global Pseudo-estático	1,114	1,10
	Local Estático	1,185	1,50
	Local Pseudo-estático	0,823	1,10

\*Los factores de seguridad dados por Slide se presentan en la sección de apéndice para los perfiles. Los factores obtenidos pertenecen al análisis en condiciones naturales donde ya existe un deslizamiento.

## Análisis de deformaciones y esfuerzos por fase2

Se presentan en el Cuadro 22 las deformaciones y esfuerzos máximos para cada uno de los perfiles

geotécnicos elaborados, en condición estática y pseudo-estática, el análisis por el método elemento finito, se realizó por medio del programa phase2 de Rocscience utilizando los parámetros específicos para cada estrato encontrado.

Cuadro 4 Resultado de análisis de estabilidad por medio de método finito.

Análisis esfuerzos y deformaciones			
Perfil	Tipo de Análisis	Deformaciones Máximas (m)	Esfuerzos Máximos
A1-A1'	Estático	0,45	0,04
	Pseudo-estático	7,60	1,02
A2-A2'	Estático	0,16	0,01
	Pseudo-estático	36,00	9,0
A3-A3'	Estático	0,14	0,01
	Pseudo-estático	13,30	2,25

\*Las deformaciones y esfuerzos se presentan en la sección de apéndice para cada uno de los perfiles. Según Newmark la deformación permisible se da de acuerdo al nivel de amenaza: bajo 0,02m, moderado 0,1-0,10 m y alto 0,50-1 m.

## Análisis geotécnico de Solución para zona 30+700

Respecto al estudio previo de la zona, a la caracterización de los materiales y al análisis

geotécnico realizado anteriormente, se plantea un diseño geométrico, con bermas de tal manera que brinde estabilidad a la zona crítica.

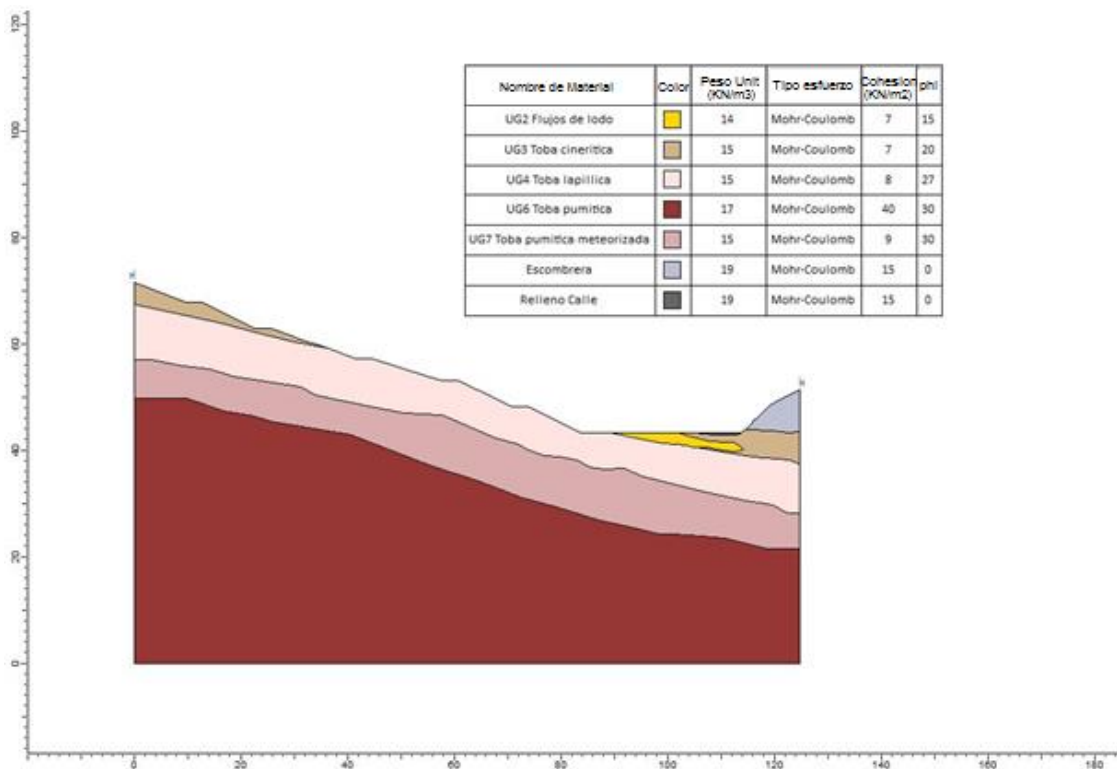


Figura 27. Solución en perfil A1-A1'. Fuente: Elaboración propia.

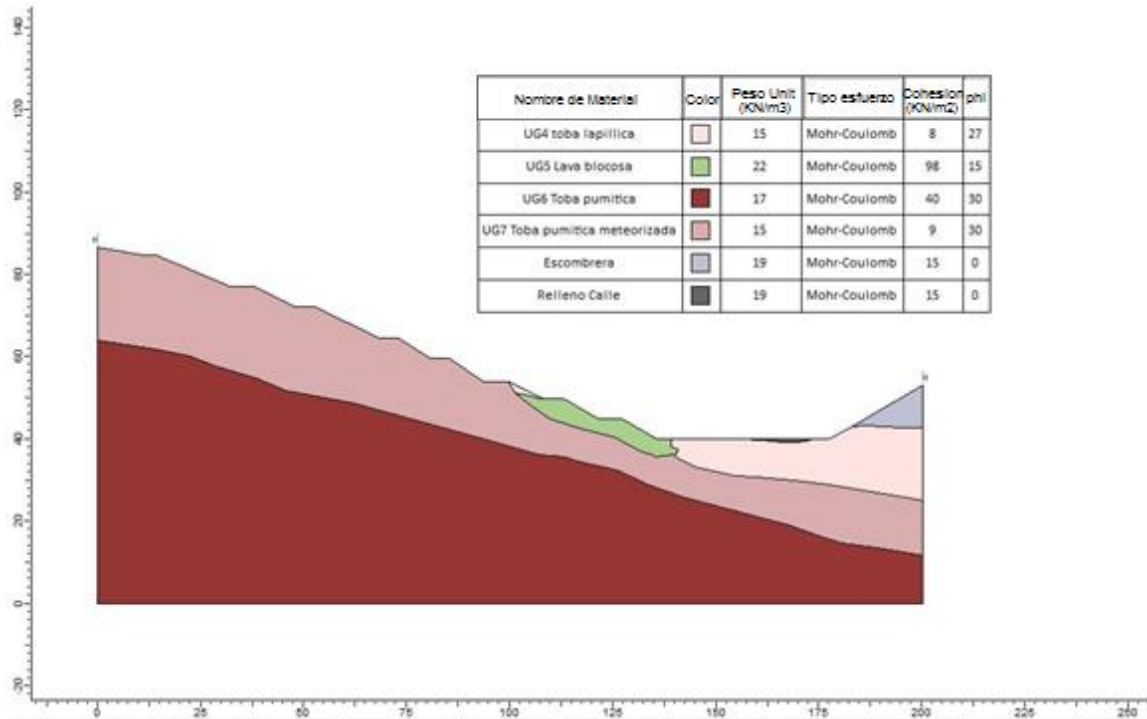


Figura 28. Solución en perfil A2-A2'. Fuente: Elaboración propia.

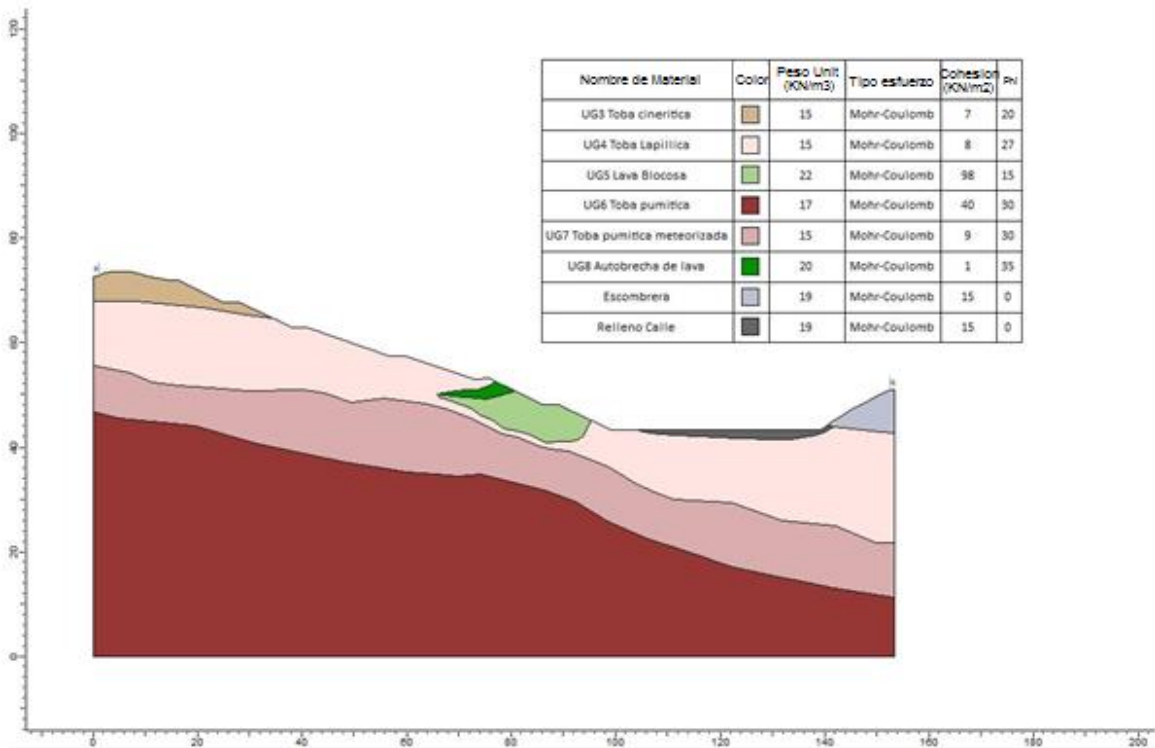


Figura 29. Solución en perfil A3-A3'. Fuente: Elaboración propia

## Análisis de estabilidad por Slide

Se presenta en el Cuadro 23 el factor de seguridad para la solución planteada, obtenido del análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite, en cada uno de los

perfiles geotécnicos realizados para condición estática y pseudo-estática. Estos análisis se realizaron por medio del programa Slide de Rocscience.

*Cuadro 5 Resultado de análisis de estabilidad de solución por medio de factor de seguridad (FS).*

<b>Factor de Seguridad con Soluciones</b>			
<b>Perfil</b>	<b>Tipo de Análisis</b>	<b>F. S obtenido</b>	<b>F.S. permisible</b>
A1-A1'	Global Estático	2,105	1,50
	Global Pseudo-estático	1,285	1,10
	Local Estático	2,114	1,50
	Local Pseudo-estático	1,284	1,10
A2-A2'	Global Estático	1,982	1,50
	Global Pseudo-estático	1,218	1,10
	Local Estático	2,137	1,50
	Local Pseudo-estático	1,308	1,10
A3-A3'	Global Estático	2,008	1,50
	Global Pseudo-estático	1,224	1,10
	Local Estático	2,066	1,50
	Local Pseudo-estático	1,206	1,10

\*Los factores de seguridad dados por Slide se presentan en la sección de apéndice para cada uno de los perfiles.

## Análisis de deformaciones y esfuerzos por phase2

Se presentan en el Cuadro 24 las deformaciones y esfuerzos máximos para cada uno de los perfiles geotécnicos elaborados, en condición estática y pseudo-estática, con la solución planteada,

el análisis se realizó por el método elemento finito, por medio del programa phase2 de Rocscience utilizando los parámetros específicos para cada estrato encontrado.

*Cuadro 6 Resultado de análisis de estabilidad de solución por medio de método finito.*

<b>Análisis esfuerzos y deformaciones con solución</b>			
<b>Perfil</b>	<b>Tipo de Análisis</b>	<b>Deformaciones Máximas (m)</b>	<b>Esfuerzos Máximos</b>
A1-A1'	Estático	0,04	0,01
	Pseudo-estático	0,09	0,04
A2-A2'	Estático	0,09	0,01
	Pseudo-estático	0,17	0,02
A3-A3'	Estático	0,07	0,01
	Pseudo-estático	0,18	0,02

\*Las deformaciones y esfuerzos dados por phase2 se presentan en la sección de apéndice para cada uno de los perfiles. Según Newmark la deformación permisible se da de acuerdo al nivel de amenaza: bajo 0,02m, moderado 0,1-0,10 m y alto 0,50-1 m.

Se presenta la solución en planta, con un cambio de geometría, sistema de manejo de aguas pluviales y revegetación. Para la

estabilización del talud, evitando o minimizando de esta forma los daños en la vía, según análisis realizados.

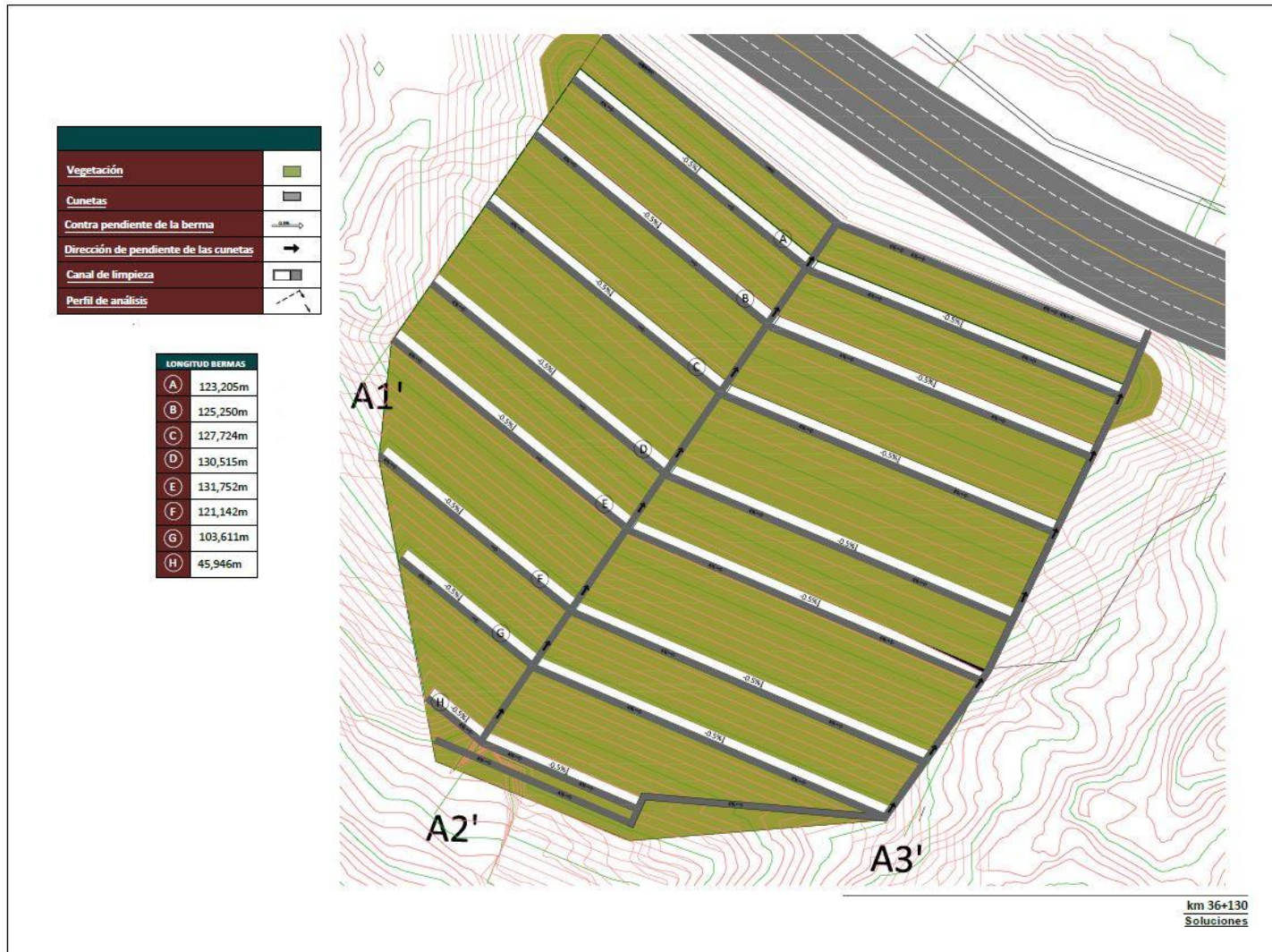


Figura 30. Solución 1 para estabilidad de zona crítica ubicada en estación 30+700. Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

En el Cuadro 25 se muestra la solución planteada para la zona estudiada en la estación 30+700. Contiene cambios de geometría por medio de

excavación, construcción de bermas con contrapendiente, sistemas de manejo de agua y revegetación para que la zona sea estable.

*Cuadro 7 Solución 1 planteada para zona critica 30+700.*

Zona Critica 30+700	
Soluciones Planteadas	
<b>Geometría Sitio</b>	
Excavación	<p>Remoción de materiales deslizados</p> <p>Remoción de materiales poco competentes</p> <p>Área a excavar 22150,60 m<sup>2</sup></p> <p>Volumen de excavación 208700,50 m<sup>3</sup></p>
Bermas	<p>Minimizar la pendiente del terreno</p> <p>Bermas 3 m de ancho</p> <p>Contrapendiente de 0,5%</p>
Pendiente	<p>Relación H: V en taludes 2:1</p> <p>Bermas con pendiente de carretera 4%</p>
<b>Sistema de evacuación de agua pluviales</b>	
Cunetas	<p>Cunetas entre bermas</p> <p>Cunetas alrededor del sitio deslizado</p>
<b>Revegetación</b>	<p>Siembra de arbustos y plantas</p>

## Análisis geotécnico de zona 36+130

Se realizó el análisis de la zona en la estación 36+130, estudiada previamente por la empresa Asesorías GEOTEC S.A., la cual brinda la información necesaria para realizar el análisis correspondiente, estas zonas pertenecen a la serie de 13 zonas estudiadas previamente, mencionada en la sección anterior.

La elección de dicha zona se realiza con base en la matriz de clasificación de inestabilidad, donde las zonas elegidas presentan una alta inestabilidad, siendo estas las más críticas.

El análisis correspondiente se realizó por medio de la recopilación de información para la construcción del modelo y el análisis correspondiente por medio de los programas Slide y Phase 2 de Rocscience. Se utiliza el método de Mohr Coulomb debido a que los materiales presentes en su mayoría son suelos, lo que representa macizos rocosos blandos, debido a la alteración de la roca.

A continuación, se muestran fotografías obtenidas en el sitio, para observar las condiciones de este:



Figura 31. Deslizamiento estacionamiento 36+130. Asesorías Geotec (2017).



Figura 32. Condiciones de inestabilidad en km 36+136. Asesorías Geotec S.A. (2017).



Figura 33. Condiciones de humedad y evidencia de flujos de agua en km 36+136. Visita a sitio (2018).

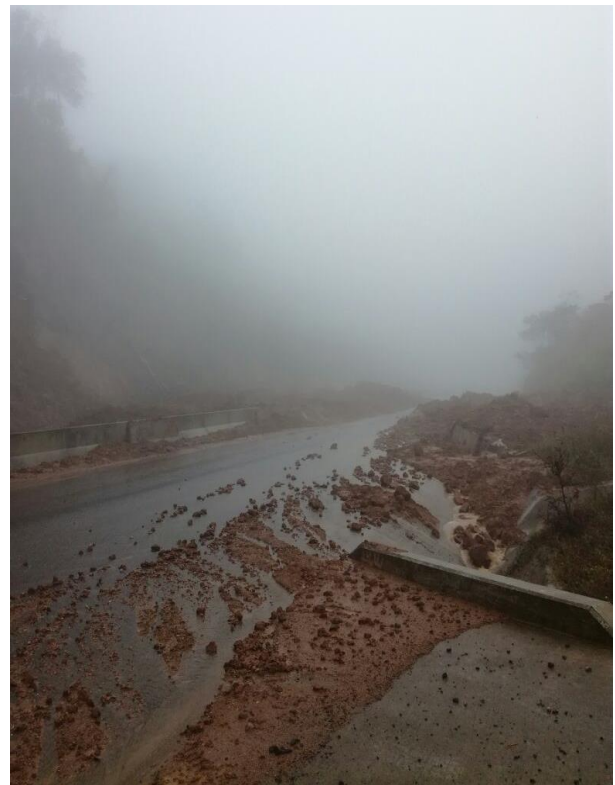


Figura 34. Deslizamiento y afectación de la vía. Km 36+136. Visita a sitio (2018).

### Clasificación de los estratos

Se realizó la clasificación del suelo en la zona con la estación 36+130, con la investigación y comparación de dicha clasificación y con un

análisis ingenieril de las perforaciones realizadas, se determinó los estratos en cada una de las estaciones críticas, como se muestra en el Cuadro 26, Cuadro 27 y Cuadro 28 a continuación.

*Cuadro 8 Unidades geotécnicas y propiedades presentes en la zona de estudio, estación 36+130.*

<b>ESTACIÓN 36+130</b>				
Unidad Geotécnica	Descripción	cohesión (KPa)	Fricción (°)	Peso Unitario Seco KN/m <sup>3</sup>
1	Depósitos Deslizados	0	22	15,4
2	Toba no consolidada	2	20	15,2
3	Toba Brechosa	7	24	16,6
4	Piro-clastos	15	35	16,1
5	Lahares compactos	25	40	20,0

\*Las unidades geotécnicas y sus propiedades se obtienen de los análisis y ensayos realizados por la empresa Asesorías GEOTEC S.A. Haciendo uso de los ensayos de compresión no confinada y de la resistencia al corte, y su correlación.

*Cuadro 9 Clasificación SUCS y límites de Atterberg, estación 36+130.*

<b>ESTACIÓN 36+130</b>				
Unidad Geotécnica	SUCS	Limite Liquido	Limite Plástico	Índice Plasticidad
1	MH	60-69	63-58	2-6
2	MH	63-69	57-60	6-9
3	SL	51-58	50-52	1-8
4	SL-ML	44-56	33-42	13-16
5	-	-	-	-

\*Los resultados se obtienen de los análisis y ensayos realizados por la empresa Asesorías GEOTEC S.A. a las muestras obtenidas en el campo.

*Cuadro 10 Unidades geotécnicas y propiedades presentes en la zona de estudio, estación 36+130.*

<b>ESTACIÓN 36+130</b>				
Unidad Geotécnica	NSPT	Razón de Poisson	Material	Modulo Young (kPa)
1	3	0,45	Plástico	5000
2	2	0,43	Plástico	10000
3	8	0,39	Plástico	24000
4	17	0,33	Plástico	55000
5	25	0,28	Plástico	172000

\*El radio de poisson y el módulo de Young fueron obtenidos por correlación según Braja M. Das. (2007).

## Modelo Geotécnico

El modelo geotécnico, se realizó a partir del modelo geológico ya definido por la empresa Asesorías GEOTEC S.A. Para el posterior análisis geotécnico, con las secciones del talud con mayor representación, esto por medio del software Slide y Phase2.

Se realizaron tres perfiles diferentes para un mejor análisis, representativo de la condición real y la variación de la topografía en la zona, como se muestra en la figura 35.

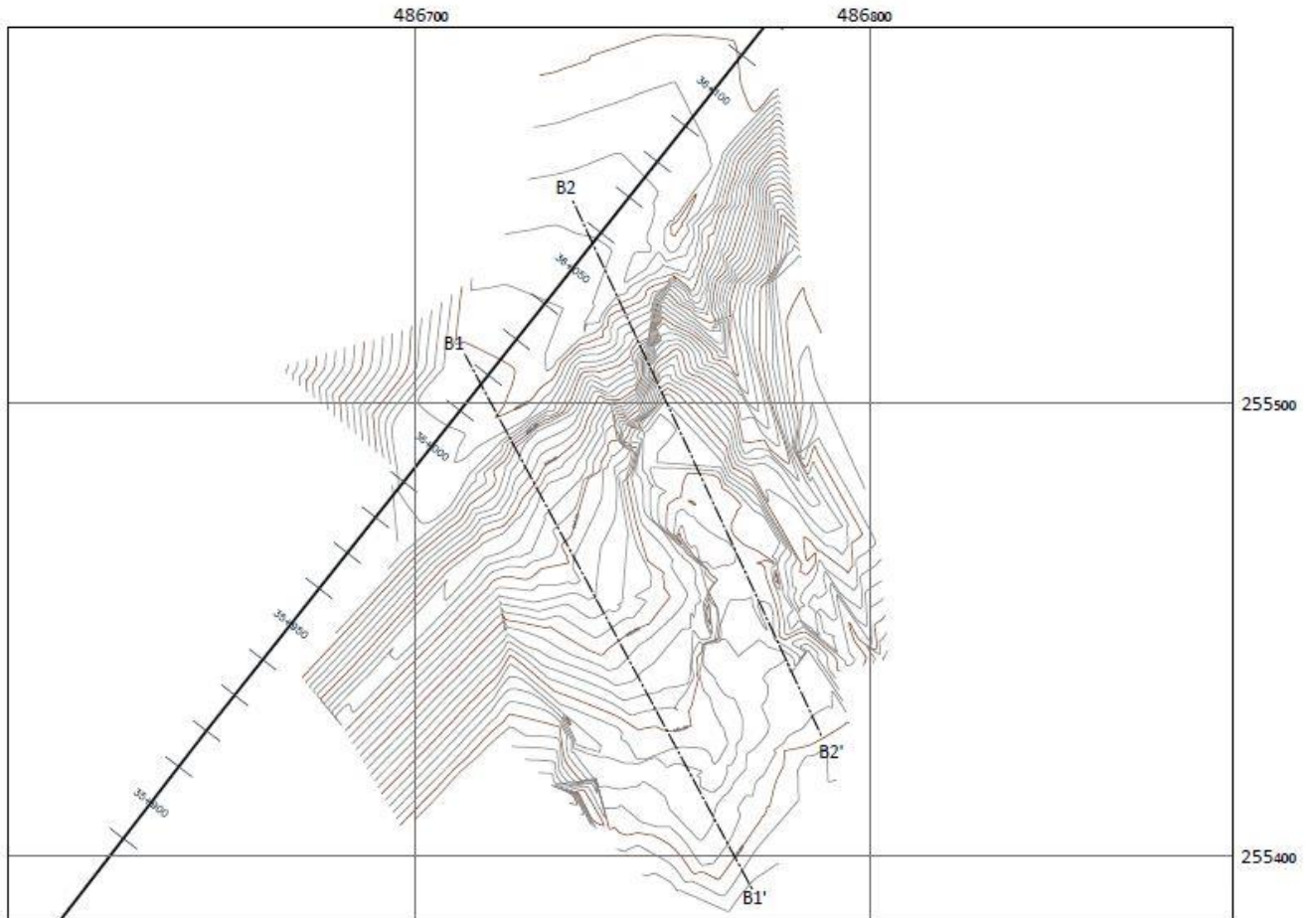


Figura 35. Ubicación de perfiles en zona crítica estación 36+130. Fuente: Elaboración propia.

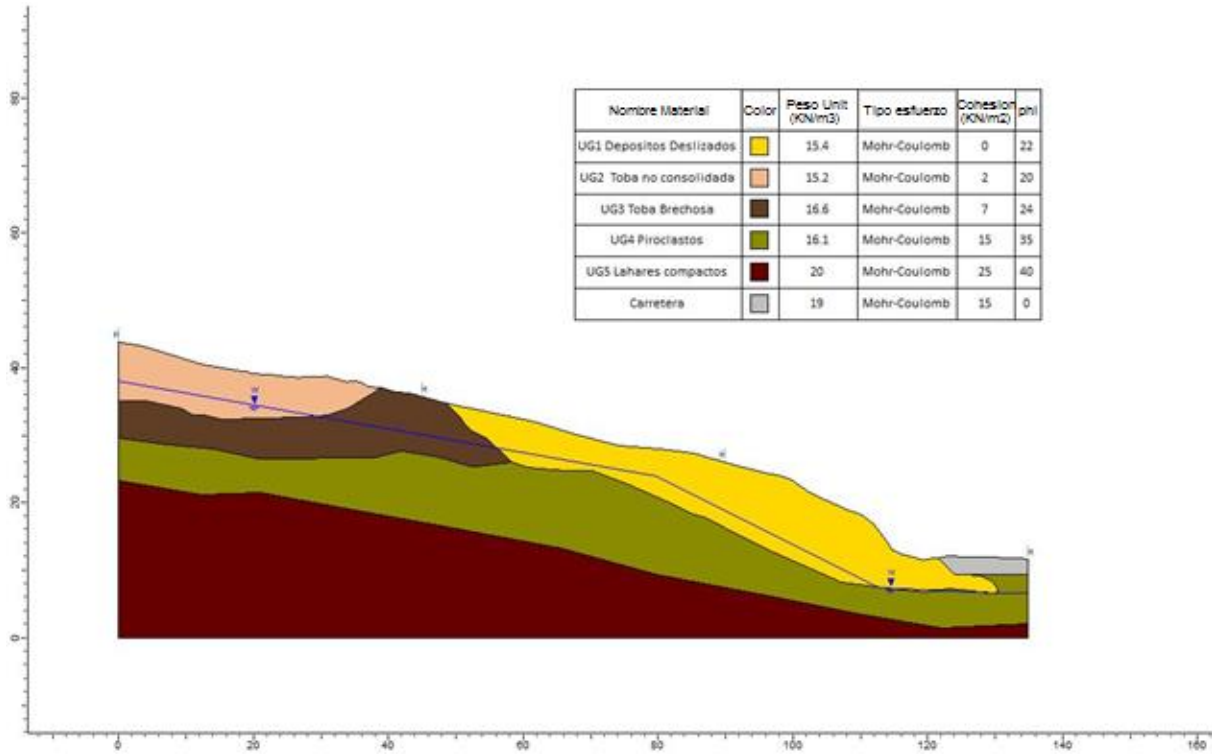


Figura 36. Perfil Geotécnico B1-B1'. Fuente: Elaboración propia.

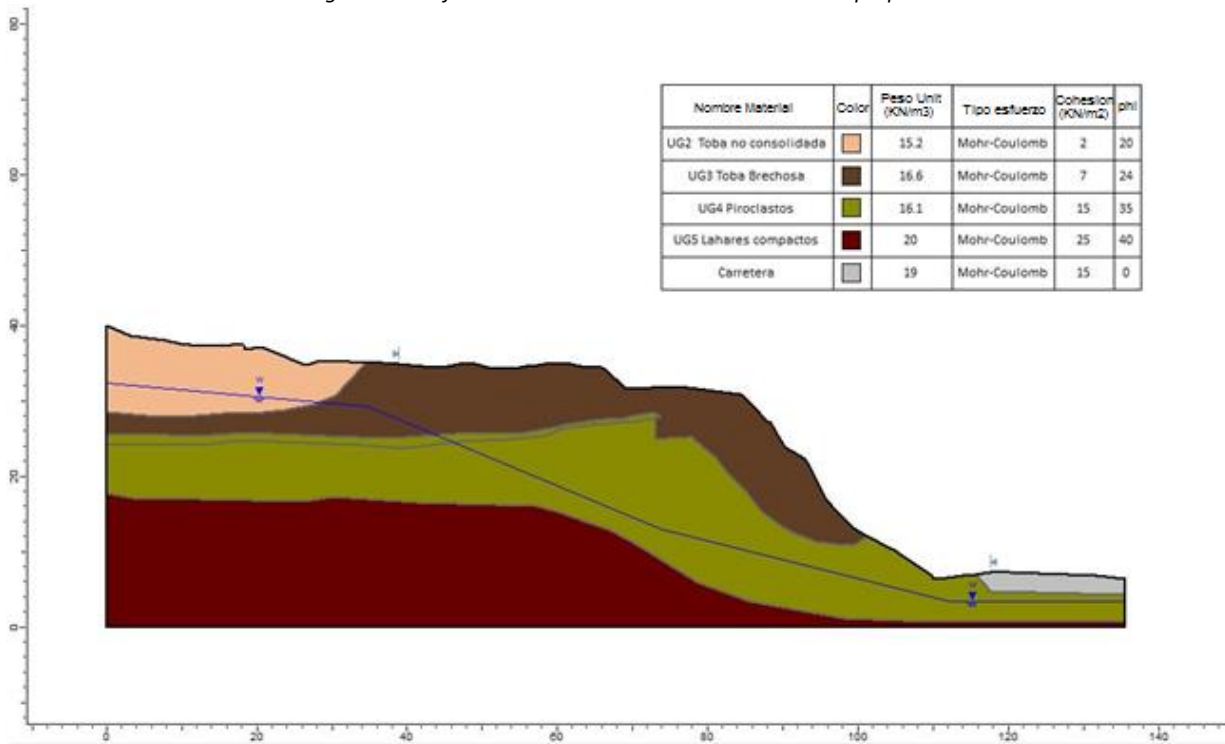


Figura 37. Perfil Geotécnico B2-B2'. Fuente: Elaboración propia.

### Análisis de estabilidad por Slide

Se presenta en el Cuadro 29 el factor de seguridad en cada uno de los perfiles analizados para condición estática y pseudo-estática de la

zona con inestabilidad, se realizó análisis globales y locales en las zonas más propensas a fallas en el talud, o ladera.

*Cuadro 11 Resultado de análisis de estabilidad por medio de factor de seguridad (FS).*

<b>Factor de Seguridad condiciones naturales</b>			
<b>Perfil</b>	<b>Tipo de Análisis</b>	<b>F. S obtenido</b>	<b>F.S. permisible</b>
B1-B1'	Global Estático	1,397	1,50
	Global Pseudo-estático	0,799	1,10
	Local Estático	1,017	1,50
	Local Pseudo-estático	0,639	1,10
B2-B2'	Global Estático	0,724	1,50
	Global Pseudo-estático	0,534	1,10
	Local Estático	0,879	1,50
	Local Pseudo-estático	0,615	1,10

\*Los factores de seguridad dados por Slide se presentan en la sección de apéndice para los perfiles. Factores de seguridad menores a 1 se justifican pues ya se presenta deslizamientos activos en la zona.

### Análisis de deformaciones y esfuerzos por medio de phase2

Se presentan en el Cuadro 30 los valores de deformación esfuerzo máximo para los perfiles geotécnicos

elaborados de la zona en estudio, este análisis se realizó por medio de Phase2, con la metodología de análisis de elemento finito.

*Cuadro 12 Resultado de análisis de estabilidad de por medio de método de elemento finito.*

<b>Análisis de esfuerzos y deformaciones</b>			
<b>Perfil</b>	<b>Tipo de Análisis</b>	<b>Deformaciones Máximas (m)</b>	<b>Esfuerzos Máximos</b>
B1-B1'	Estático	0,51	0,11
	Pseudo-estático	15,20	2,60
B2-B2'	Estático	2,25	0,38
	Pseudo-estático	19,0	3,60

\*Las deformaciones y esfuerzos dados por phase2 se presentan en la sección de apéndice para cada uno de los perfiles. Según Newmark la deformación permisible se da de acuerdo al nivel de amenaza: bajo 0,02m, moderado 0,1-0,10 m y alto 0,50-1 m.

## Análisis geotécnico de Solución 1 para zona 36+130

Respecto al estudio previo de la zona, la caracterización y clasificación de los materiales y

al análisis geotécnico realizado anteriormente, se plantea un diseño geométrico, taludes con una relación H: V de 2:1, bermas que tengan una contrapendiente y un sistema de evacuación de aguas pluviales.

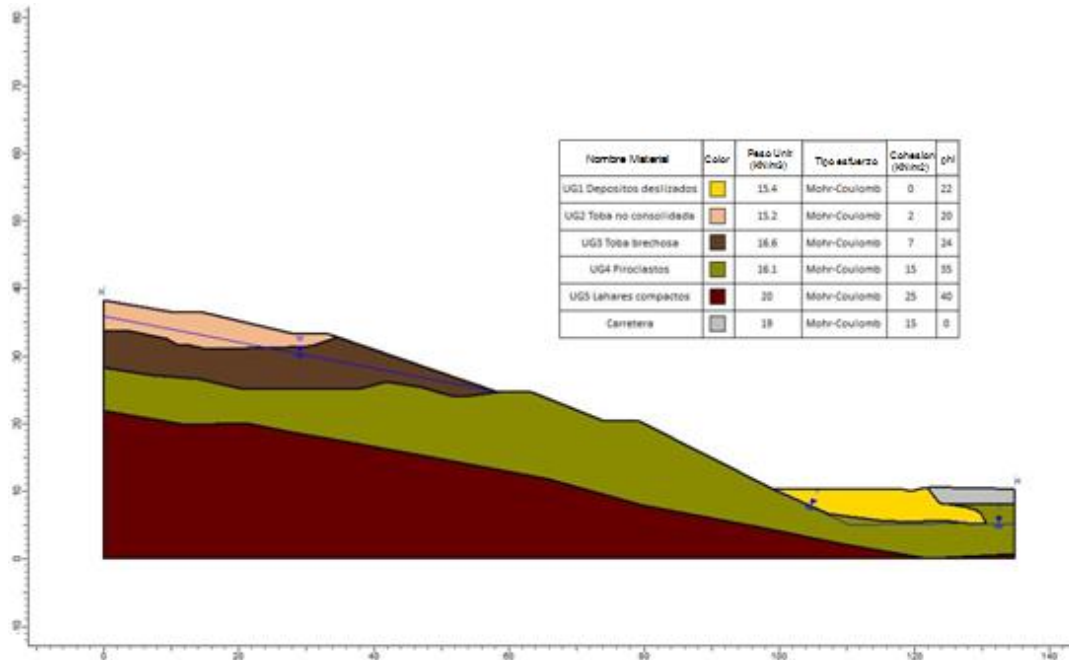


Figura 38 Solución1 en perfil B1-B1'. Fuente: Elaboración propia.

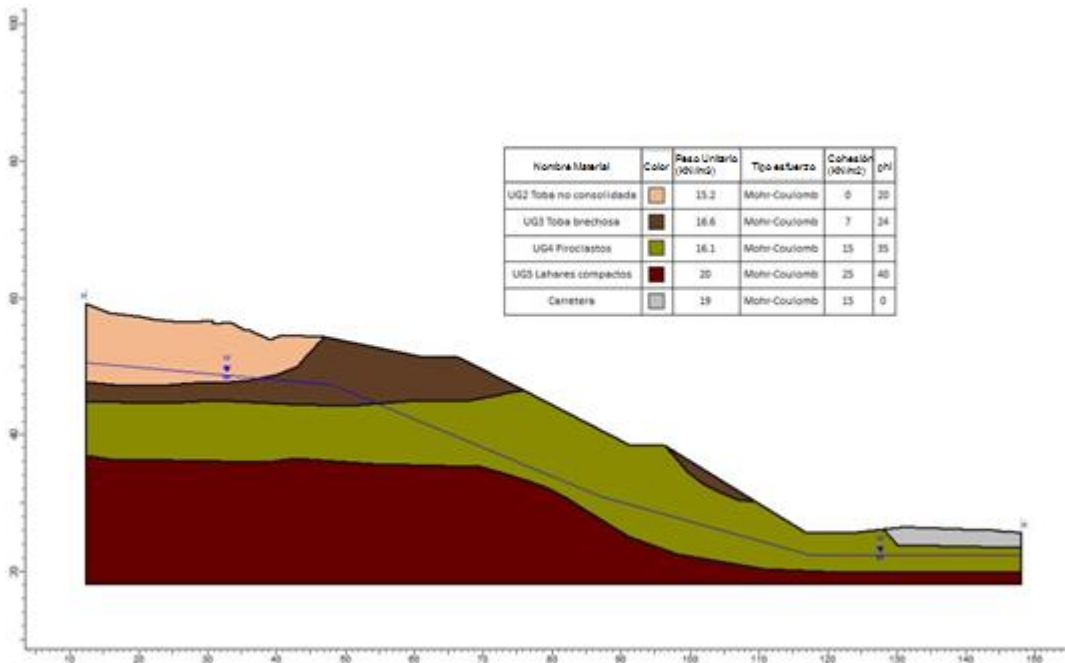


Figura 39. Solución1 en perfil B2-B2'. Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

## Análisis de estabilidad por Slide

Se muestran los resultados del factor de seguridad en el Cuadro 31 obtenidos por medio del análisis realizado a la solución planteada para la

zona con estacionamiento 36+130, con el análisis de equilibrio límite por medio del programa Slide de Rocscience.

*Cuadro 13 Resultado de análisis de estabilidad con solución 1 por medio de factor de seguridad (FS).*

<b>Factor de Seguridad con solución</b>			
<b>Perfil</b>	<b>Tipo de Análisis</b>	<b>F. S obtenido</b>	<b>F.S. permisible</b>
B1-B1'	Global Estático	1,953	1,50
	Global Pseudo-estático	1,100	1,10
	Local Estático	2,219	1,50
	Local Pseudo-estático	1,172	1,10
B2-B2'	Global Estático	2,047	1,50
	Global Pseudo-estático	1,287	1,10
	Local Estático	2,407	1,50
	Local Pseudo-estático	1,411	1,10

\*Los factores de seguridad dados por Slide se presentan en la sección de apéndice para los perfiles.

## Análisis de deformaciones y esfuerzos por medio de Phase 2

Se presenta en el Cuadro 32 las deformaciones y esfuerzos máximos para cada uno de los perfiles geotécnicos elaborados, en condición estática y pseudo-estática, con la solución planteada, el

análisis se realizó por el método numérico de elemento finito, por medio del programa phase2 de Rocscience utilizando los parámetros específicos para cada estrato encontrado

*Cuadro 14 Resultado de análisis de estabilidad con solución 1 por medio de método finito.*

<b>Análisis esfuerzos y deformaciones con Solución</b>			
<b>Perfil</b>	<b>Tipo de Análisis</b>	<b>Deformaciones Máximas (m)</b>	<b>Esfuerzos Máximos</b>
B1-B1'	Estático	0,04	0,02
	Pseudo-estático	0,26	0,04
B2-B2'	Estático	0,05	0,02
	Pseudo-estático	0,18	0,03

\*Las deformaciones y esfuerzos dados por phase2 se presentan en la sección de apéndice para cada uno de los perfiles. Según Newmark la deformación permisible se da de acuerdo al nivel de amenaza: bajo 0,02m, moderado 0,1-0,10 m y alto 0,50-1 m.

Se presenta la solución en planta, con un cambio de geometría, sistema de manejo de aguas pluviales y revegetación. Para la

estabilización del talud, evitando o minimizando de esta forma los daños en la vía, según análisis realizados.

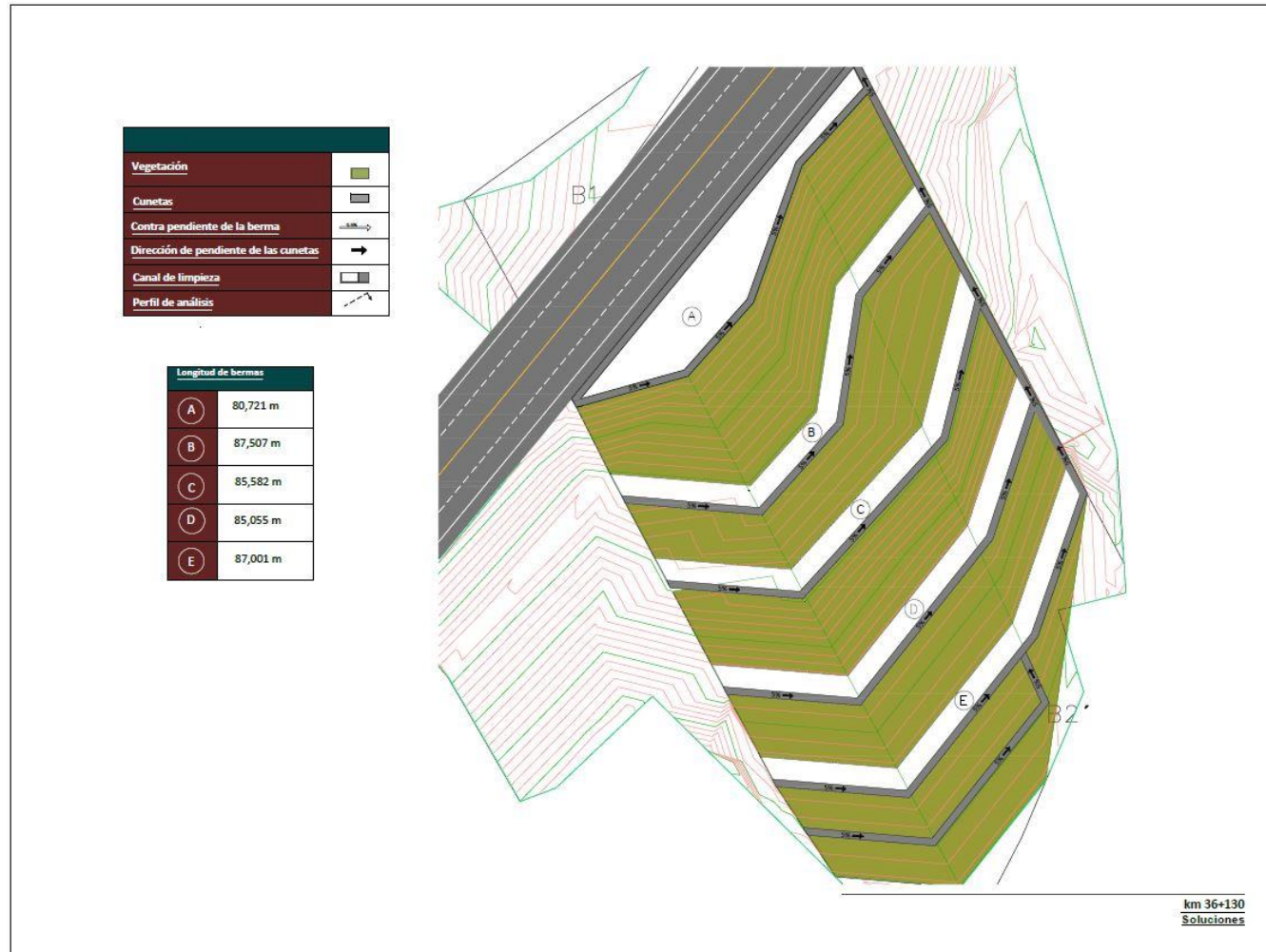


Figura 40. Solución 1 planteada para estabilidad de zona crítica estación 36+130.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

## Análisis geotécnico de Solución 2 para zona 36+130

Respecto al estudio previo de la zona, la caracterización y clasificación de los materiales y al análisis geotécnico realizado anteriormente, se

plantea un diseño geométrico, con bermas y, una pendiente menor con una relación H: V de 2:1, eliminando los materiales poco competentes. Con anclajes pasivos y un suelo cocido, los cálculos para estos anclajes se presentan en la sección de apéndice.

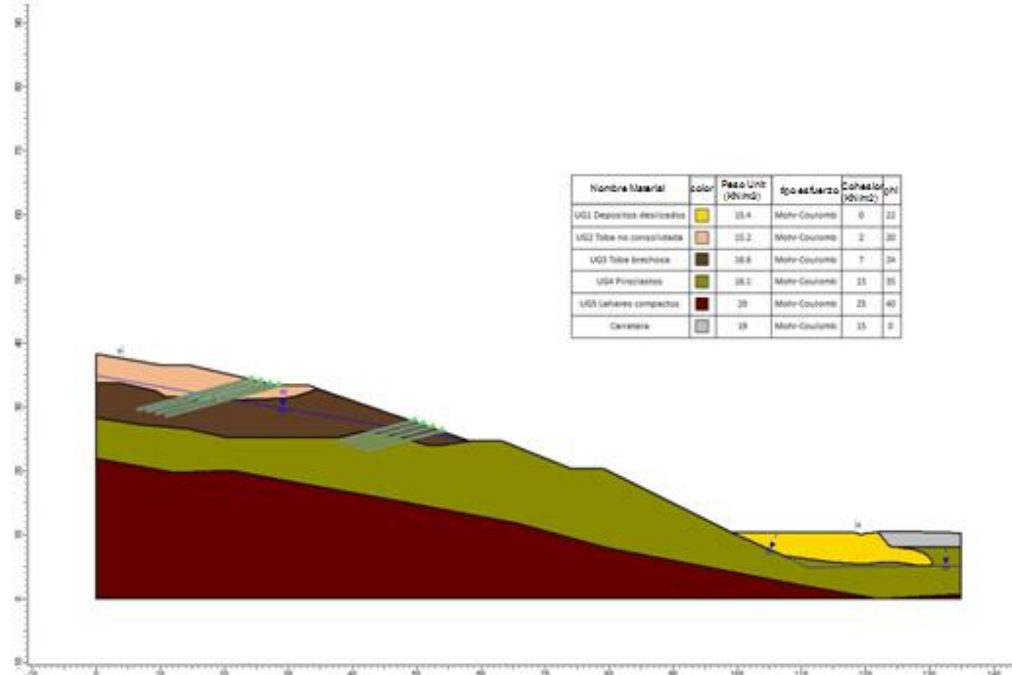


Figura 41. Solución 2 en perfil B1-B1'. Fuente: Elaboración propia.

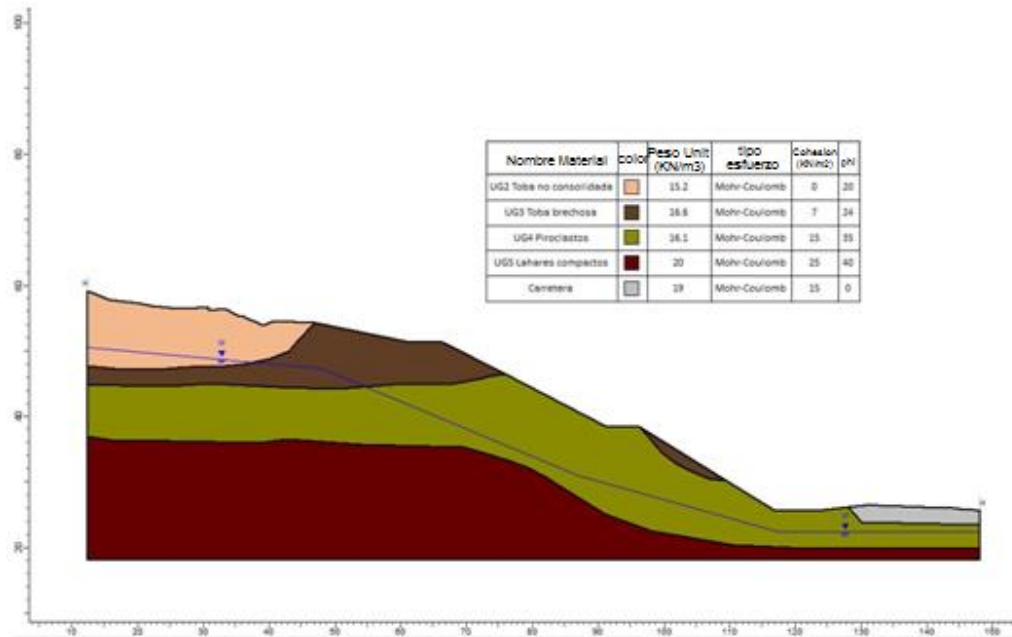


Figura 42. Solución 2 en perfil B2-B2'. Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

## Análisis de estabilidad por Slide

Se muestra en el Cuadro 33 los resultados del factor de seguridad obtenidos por medio del análisis realizado a la solución planteada para la zona

36+130, con el análisis de equilibrio límite por medio del programa Slide de Rocscience.

*Cuadro 15 Resultado de análisis de estabilidad con solución 2 por medio de factor de seguridad (FS).*

<b>Factor de Seguridad con solución</b>			
<b>Perfil</b>	<b>Tipo de Análisis</b>	<b>F. S obtenido</b>	<b>F.S. permisible</b>
B1-B1'	Global Estático	2,313	1,50
	Global Pseudo-estático	1,295	1,10
	Local Estático	2,363	1,50
	Local Pseudo-estático	1,401	1,10
B2-B2'	Global Estático	2,047	1,50
	Global Pseudo-estático	1,287	1,10
	Local Estático	2,407	1,50
	Local Pseudo-estático	1,411	1,10

\*Los factores de seguridad dados por Slide se presentan en la sección de apéndice para los perfiles.

## Análisis de deformaciones y esfuerzos por medio de Phase 2

Se presenta en el Cuadro 34 las deformaciones y esfuerzos máximos para cada uno de los perfiles geotécnicos elaborados, en condición estática y Pseudo-estático, con la solución planteada, el

análisis se realizó por el método elemento finito, por medio del programa phase2 de Rocscience utilizando los parámetros específicos para cada estrato encontrado.

*Cuadro 16 Resultado de análisis de estabilidad con solución 2 por medio de método finito.*

<b>Análisis esfuerzos y deformaciones con Solución</b>			
<b>Perfil</b>	<b>Tipo de Análisis</b>	<b>Deformaciones Máximas (m)</b>	<b>Esfuerzos Máximos</b>
B1-B1'	Estático	0,04	0,02
	Pseudo-estático	0,14	0,03
B2-B2'	Estático	0,05	0,02
	Pseudo-estático	0,18	0,03

\*Las deformaciones y esfuerzos dados por phase2 se presentan en la sección de apéndice para cada uno de los perfiles. Según Newmark la deformación permisible se da de acuerdo al nivel de amenaza: bajo 0,02m, moderado 0,1-0,10 m y alto 0,50-1 m.

Se presenta la solución en planta, con un cambio de geometría, sistema de manejo de aguas pluviales, revegetación y suelo cocido con anclajes pasivos. Promoviendo la estabilización del

talud, evitando o minimizando de esta forma los daños en la vía, según análisis realizados.

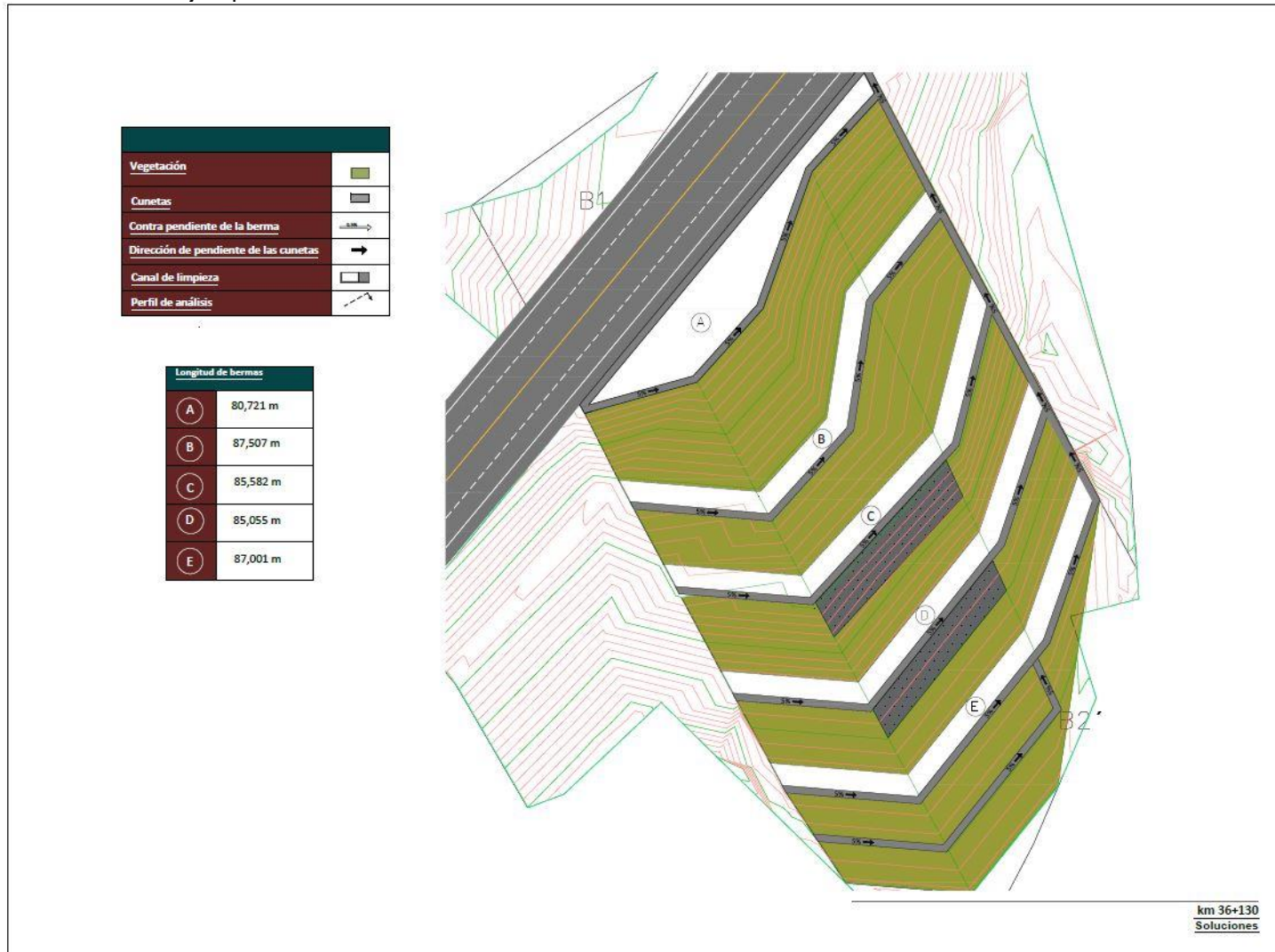


Figura 43. Solución 2 planteada para estabilidad de zona crítica, estación 36+130

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

En el Cuadro 35 se muestra la solución planteada para la zona estudiada en la estación 36+130. Contiene cambios de geometría por medio de excavación, construcción de bermas con contrapendiente, sistemas de manejo de agua,

revegetación y suelo cocido con anclajes pasivos para que la zona sea estable.

*Cuadro 17 Solución planteada para zona critica 36+130.*

<b>Zona Critica 36+130</b>	
Soluciones Planteadas	
<b>Geometría Sitio</b>	
Excavación	Remoción de materiales deslizados Remoción de materiales poco competentes Área a excavar 7644,58 m <sup>2</sup> Volumen de excavación 33618,99 m <sup>3</sup>
Bermas	Minimizar la pendiente del terreno Bermas 5 m de ancho Contrapendiente de 0,5%
Pendiente	taludes relación H: V 2:1 bermas con pendiente de carretera 5%
<b>Sistema de evacuación de agua pluviales</b>	
Cunetas	Cunetas entre bermas Cunetas alrededor del sitio deslizado
Drenajes	Sistema de drenajes para control de nivel freático
<b>Estructura de refuerzo</b>	
Suelo Cocido	Para talud superior Pernos longitud 18 m varilla N°7 G60 @1,5m Angulo de perforación respecto a horizontal 195° Refuerzo As 4cm <sup>2</sup> malla con separación 15 cm G60. varilla #3 amarre. Para talud inferior Pernos longitud 12 m varilla N°7 G60 @1,5m Angulo de perforación respecto a horizontal 195° Refuerzo As 4cm <sup>2</sup> malla con separación 15 cm G60 varilla #3 para amarre.
<b>Revegetación</b>	Siembra de arbustos y plantas

## Planteamiento de acciones correctivas para zonas críticas: Estación 17+400



Figura 44. Zona crítica, estación 17+400 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Control de Aguas** El Control de agua en las escombreras frente a la zona estudiada es fundamental para controlar los posibles problemas en la carretera, ya que al existir problemáticas de drenajes que afectan las presiones de poro y presiones intersticiales, están cambian las condiciones hidrogeológicas lo que es un factor desencadenante de deslizamiento.

Existe área disponible para implementar sistemas de control de aguas dando énfasis a disminuir los riesgos, cambios y daños en la carretera. El control de agua se puede implementar por medio de la nivelación del sitio, al suavizar la topografía de sitio se evita que el agua de la superficie se almacene o se concentre con el agua subterránea. Otra opción es la construcción de zanjas para el control del agua

superficial, es conveniente en la cabeza del deslizamiento, son eficaces una serie de zanjas de corte que cruzan el terreno y los drenajes laterales para dirigir el escurrimiento del agua que se presenta alrededor del deslizamiento.

**Geometría del Talud** Es fundamental cambiar la geometría del talud presente, con cortes en el terreno y la construcción de bermas con tamaños redimensionados, los cuales aseguren de mejor forma la estabilidad de la zona, dando un énfasis de mayor importancia en la coronado del talud ya que es donde se presenta mayor elevación y pendiente. Aunque implica un movimiento de tierra elevado, por la altura de la zona y los deslizamientos de material presentes, es una de las principales opciones.

## Estación 18+600



Figura 45. Zona crítica, estación 18+600 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Geometría del Talud** Realizar bermas con tamaños redimensionados, los cuales aseguren de mejor forma la estabilidad de la zona, dando un énfasis de mayor importancia a la zona lateral derecha la cual presenta movimientos activos, con deslizamientos de materiales, debido a la altura y la pendiente elevada de la zona, se recomienda una reconstrucción de bermas con un diseño superior que contemple el área donde se han presentado inestabilidades actualmente.

Las bermas son escalones cortados en un suelo profundo o en una roca, esto para reducir las fuerzas motrices. Son eficaces para reducir la incidencia de fallas superficiales.

**Control de Aguas** Debido al clima de la zona y el tipo de material en la zona estudiada, el control de agua en las bermas se vuelve imprescindible, es fundamental controlar las problemáticas de drenajes que afectan las presiones de poro y presiones intersticiales, ya que están cambian las

condiciones hidrogeológicas lo que es un factor desencadenante de deslizamiento.

Se pueden implementar las tuberías de drenaje ya que son tuberías de desagüe horizontal, sistema utilizado para prevenir deslizamientos en la construcción de carreteras principalmente, cumplen mejor su función si se instalan durante la excavación inicial, estos son eficaces si se instalan de manera correcta que permita que el tubo cruce la superficie de falla y drene el suelo.

Cada uno de estos sistemas debe diseñarse individualmente debido a que la mayoría de los suelos tienen pendientes, condiciones hidráulicas y geométricas diferentes, más aún en este caso que se posee una altura de gran magnitud.

## Estación 19+800



Figura 46. Zona crítica, estación 19+800 Fuente: Asesorías GEOTEC.

### Geometría del talud

Corte para remover el material deslizado y generan una pendiente adecuada para la construcción de la protección del suelo. Se debe dar una reconstrucción y redimensionamiento de las bermas actuales.

Se debe dar protección del suelo ante el impacto de la lluvia, ya que remueven y excavan la matriz, al ser una zona húmeda que presenta precipitaciones y un clima variante. Por lo tanto, se recomiendan las siguientes protecciones:

**Concreto Lanzado** Por lo que se recomienda concreto lanzado, aplicando presión mediante un chorro de aire directamente sobre la superficie inestable. Es un método rápido utilizado el cual también permite dar un refuerzo a la superficie entre bloques, reduce la erosión y la socavación de la superficie. Puede cubrir grandes superficies en poco tiempo

**Geo manta anclada** Existen diversos materiales en el mercado, principalmente polímeros que permiten formar una malla liviana con alta

resistencia a la tensión. Esta malla añade fuerza a la resistencia al corte del suelo.

Una geo manta anclada con pernos, permite la estabilización del suelo dando protección al suelo contra la erosión, permitiendo que la vegetación crezca, evitando la acumulación de aguas que desencadenan un deslizamiento.

**Anclajes** Colocación de malla de acero de alta resistencia con pernos pasivos, son herramientas para el sostenimiento del terreno, que permiten brindar estabilidad. Los anclajes con pernos permiten el sostenimiento del terreno generando una mayor fricción entre el perno y el terreno que permite que este no se deslice tan fácilmente.

**Revegetación** Cobertura vegetal densa, la revegetación reduce significativamente los procesos de erosión, esto se hace plantando diferentes tipos de arbustos que generan una cubierta vegetal que fortalece las raíces y mejora la estabilidad del suelo.

## Estación 20+050



Figura 47. Zona crítica, estación 20+050 Fuente: Asesorías GEOTEC.

### Geometría de talud

Se debe realizar un corte para remover el material deslizado y generar una pendiente adecuada para la construcción de la protección del suelo. Se debe dar una reconstrucción y redimensionamiento de las bermas y sistemas de drenajes actuales. Se debe dar protección del suelo ante el impacto de la lluvia, ya que remueven y excavan la matriz, al ser una zona húmeda que presenta precipitaciones y un clima variante.

**Concreto Lanzado** Por lo que se recomienda concreto lanzado, aplica dando presión mediante un chorro de aire directamente sobre la superficie inestable. Es un método rápido utilizado el cual también permite dar un refuerzo a la superficie entre bloques, reduce la erosión y la socavación de la superficie. Puede cubrir grandes superficies en poco tiempo.

**Geo manta anclada** Existen diversos materiales en el mercado, principalmente polímeros que permiten formar una malla liviana con alta resistencia a la tensión. Esta malla añade fuerza a la resistencia al corte del suelo. Una geo manta anclada con pernos, permite la estabilización del suelo dando protección al suelo contra la erosión, permitiendo que la vegetación crezca, evitando la acumulación de aguas que desencadenan un deslizamiento.

**Anclajes** Colocación de malla de acero de alta resistencia con pernos pasivos, son herramientas para el sostenimiento del terreno, que permiten brindar estabilidad. Los anclajes con pernos permiten el sostenimiento del terreno generando una mayor fricción entre el perno y el terreno que permite que este no se deslice tan fácilmente.

**Revegetación** cobertura vegetal densa, la revegetación reduce significativamente los procesos de erosión, esto se hace plantando diferentes tipos de arbustos que generan una cubierta vegetal que fortalece las raíces y mejora la estabilidad del suelo. La estación 19+800 y la estación 20+050 se encuentran muy cercanas, las cuales presentan las mismas condiciones. La problemática actual en la zona se genera en mayor parte debido a la construcción de escombreras ubicadas al otro lado de la carretera, frente a los taludes estudiados, produciendo así el movimiento masivo de la zona en cuestión y por ende grietas presentes en la carretera, por lo que es de suma importancia, evaluar una solución la cual contemple las escombreras mencionadas. Una solución es:

**Excavación** Se debe realizar un corte, que permita remover gran parte del material que genera contra peso y activa movimientos en la zona. Esto debido a que las escombreras poseen una carga aplicada en la cabeza, aumentando las fuerzas impulsoras y disminuyendo la estabilidad.

## Estación 20+800



Figura 48. Zona crítica, estación 20+800 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Pilas** Una de las soluciones propuestas es el uso de pilas que se convierte en un puente de 4 carriles. El diámetro de las pilas debería ser de gran magnitud. Las pilas son estructuras que dan soporte, deben ser construidas sobre un terreno firme con capacidad de soporte, debido a su peso.

Cimentando la estructura sobre un material local estable, para lo cual es necesario modificar el trazo, y asegurar la estabilidad de la ladera al este mejorando la condición geomecánicas y resistencia de la capa a la cual se le atribuye la movilización de la masa.

**Pilotes** Para la colocación de las pilas se vuelve fundamental la estabilidad del talud externo en la zona, por lo que una pantalla de pilotes en el talud externo podría brindar la estabilidad necesaria. En la base de una pendiente se pueden colocar pilotes de gran diámetro para formar una pared vertical. En este caso se utiliza como un sistema de retención que brinda estabilidad al talud. Se recomiendan pilotes de concreto, ya que estos cumplen una mejor función.

**Cortes** Otra solución es realizar cortes, que eliminen las capas débiles, a pesar de ser un movimiento de tierra de gran magnitud, las características de los materiales presentes de manera superficial en la zona no prometen grandes aportes a la estabilidad, al realizar los cortes podría ser necesario un refuerzo.

**Bermas** Al realizar cortes en el terreno es importante considerar las bermas, ya que permiten una mejor estabilización y un tramo de reposo para el material que permite disminuir el movimiento de los materiales.

**Sistemas manejo de aguas** Se deben realizar cunetas que permitan controlar el agua superficial, tanto en la parte superior del talud como intercaladas en cada una de las bermas, las cuales deben poseer una contrapendiente para dar dirección al agua desplazada. Siendo un sistema de drenaje superficial, con una serie de zanjas de corte que cruzan el terreno y los drenajes laterales para dirigir el escurrimiento del agua que se presenta alrededor del deslizamiento.

## Estación 21+050



Figura 49. Zona crítica, estación 21+050 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Geometría del Talud/ Corte** Realizar cortes para eliminar los materiales deslizados (suelos), dando un énfasis de mayor importancia en la corona del talud ya que es donde se presenta mayor elevación y pendiente.

La Reducción de la altura de la pendiente, reduce la fuerza impulsora en el plano de falla, reduce el peso de la masa de suelo. Por el contrario, al eliminar material del pie reduce las fuerzas de resistencia y reduce la estabilidad.

**Bermas** Son escalones cortados en un suelo, esto para reducir las fuerzas motrices. Son eficaces para reducir la incidencia de fallas superficiales.

Por lo tanto, se deben generar los cortes con bermas de tamaños mayores (redimensionamiento y reconstrucción de bermas), los cuales aseguren de mejor forma la estabilidad de la zona, las bermas deben tener un

grado de inclinación, un contrapendiente que permita la instalación de los sistemas de drenaje, para la dirección de las aguas.

**Sistemas de manejo de aguas** Se deben realizar cunetas que permitan controlar el agua superficial, tanto en la parte superior del talud como intercaladas en cada una de las bermas, las cuales deben poseer una contrapendiente para dar dirección al agua desplazada.

Al suavizar la topografía de la superficie de deslizamiento, se evita que el agua de la superficie se almacene o se conecte con el agua subterránea.

Con la construcción de las cunetas se realizan una serie de zanjas de corte que cruzan el terreno y los drenajes laterales para dirigir el escurrimiento del agua que se presenta alrededor del-deslizamiento.

## Estación 21+640



Figura 50. Zona crítica, estación 21+640 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Geometría del talud/Corte:** Se debe remover el material deslizado en la zona, generando un talud con una pendiente menor, esto con el objetivo de disminuir el ángulo del talud y que no se dé un desplazamiento de mayor magnitud que la actual.

**Concreto Lanzado con malla de refuerzo:** aplicando presión mediante un chorro de aire directamente sobre la superficie inestable. Es un método rápido utilizado el cual también permite dar un refuerzo a la superficie entre bloques, reduce la erosión y la socavación de la superficie, puede cubrir grandes superficies en poco tiempo.

**Geo manta anclada:** Existen diversos materiales en el mercado, principalmente polímeros que permiten formar una malla liviana con alta resistencia a la tensión. Esta malla añade fuerza a la resistencia al corte del suelo. Se recomienda una geo manta anclada con pernos, que permita la estabilización del suelo dando protección al

suelo contra la erosión, permitiendo que la vegetación crezca, evitando la acumulación de aguas que desencadenan un deslizamiento.

**Sistemas de manejo de aguas:** Reconstrucción del sistema de aguas existente, debido al deslizamiento de algunos materiales, las cunetas han sido desplazadas, por lo tanto, se debe dar una reconstrucción, la cual conduzca las aguas superficiales tanto de la corona del deslizamiento como de los costados hasta la cuneta de la carretera.

El control de agua se puede implementar por medio de la construcción de zanjas para el control del agua superficial, es conveniente en la cabeza del deslizamiento, son eficaces una serie de zanjas de corte que cruzan la parte superior del terreno y los drenajes laterales para dirigir el escurrimiento del agua que se presenta alrededor del deslizamiento.

## Estación 29+100



Figura 51. Zona crítica, estación 29+100 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Corte** La Remoción de tierra en la cabeza de un deslizamiento, reduce las fuerzas impulsoras y aumenta la estabilidad, este método es adecuado para hacer cortes en suelos profundos, se debe eliminar el peso en la cabeza de la ladera, aumentando el peso en el pie de este para que brinde soporte al material en la parte superior.

**Geometría del Talud** Proporcionar una pendiente adecuada para que en condición pseudo-estática el talud sea estable, disminuyendo el ángulo del talud. La reducción de la altura de la pendiente minimiza la fuerza impulsora en el plano de falla, reduciendo también el peso de la masa de suelo.

**Bermas** La construcción de bancos o gradas que disminuyan la pendiente, y permitan un reposo en el peso del material, ayuda significativamente a la

estabilidad del talud, principalmente para minimizar la erosión y socavación junto con los sistemas de drenaje, de igual forma funcionan para retener material desplazado y que este no caiga sobre la carretera.

**Estructura de contención** Para aumentar el peso en el pie del talud, y generar una mayor estabilidad del talud, se recomienda la construcción de un muro de contención, en el pie del talud que brinde un confinamiento al mismo.

**Sistemas manejo de aguas** Se deben realizar cunetas que permitan controlar el agua superficial, tanto en la parte superior del talud como intercaladas en cada una de las bermas, las cuales deben poseer un contrapendiente para dar dirección al agua desplazada.

## Estación 30+700



Figura 52. Zona crítica, estación 30+700 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Geometría del talud/Corte** Como obra de estabilización, movimiento de tierra para generar taludes extendidos y extendiéndose hasta el escarpe temporal encontrado. Debido a la presencia de materiales desplazados y flujos de lodo, es necesario remover estos materiales que poseen características malas y no aportan estabilidad a la zona.

**Bermas** la Implementación de bermas, en esta zona es fundamental, ya que es una de las formas más eficaces de protección contra los derrumbes, reducen la fuerza de tracción en las rocas de superficie y reducen las tasas de erosión superficial. También reducen la frecuencia de los desprendimientos de material. Y ayuda a disminuir las pendientes entre los taludes. El ángulo de la cara de los bancos se puede construir de manera más inclinada, de manera que los bloques que caen permanecen en los bancos, así como para la implementación de sistemas de manejo de agua en estos.

**Sistemas manejo de aguas** Se deben realizar cunetas que permitan controlar el agua superficial, tanto en la parte superior del talud como intercaladas en cada una de las bermas, las cuales deben poseer una contrapendiente para dar dirección al agua desplazada. Las cunetas cumplen una mejor función en la cabeza de los taludes, permite recolectar las aguas superficiales sin que estas provoquen cambios en las condiciones hidrológicas del terreno, y en las presiones de poro que aumentan la posibilidad de movimiento.

**Construcción Túnel** Debido a las condiciones presentes en la zona, la presencia de lagunas, movimientos de tierras, fallas y otras existe la posibilidad de un mega-deslizamiento, por lo que se propone la construcción de un túnel vial que solucione la problemática anterior en la zona, previendo el fenómeno de un deslizamiento de gran magnitud.

## Estación 31+100



Figura 53. Zona crítica, estación 31+100 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Sistemas manejo de aguas** Implementación de un eficiente manejo de aguas en la zona, así como medidas de prevención para la erosión. Se deben realizar cunetas que permitan controlar el agua superficial, tanto en la parte superior del talud como intercaladas en cada una de las bermas, las cuales deben poseer un contrapendiente para dar dirección al agua desplazada

**Revegetación** cobertura vegetal densa, la revegetación reduce significativamente los procesos de erosión, esto se hace plantando diferentes tipos de arbustos que generan una cubierta vegetal que fortalece las raíces y mejora la estabilidad del suelo.

**Geo-manta Anclada** La geo-manta forma una malla liviana con alta resistencia a la tensión.

Esta malla añade fuerza a la resistencia al corte del suelo. Se recomienda una geo manta anclada con pernos, que permita la estabilización del suelo dando protección al suelo contra la erosión, permitiendo que la vegetación crezca, evitando la acumulación de aguas y la reducir la sedimentación que desencadenan un deslizamiento

**Monitoreo** Se recomienda una evaluación o control topográfica constante de la ladera. Así como la implementación de sistemas de monitoreo que midan movimientos, presión de poro y deformación entre puntos.

## Estación 33+800



Figura 54 . Zona crítica, estación 33+800 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Corte** Remover material deslizado en la zona, generando cortes que favorezcan la estabilidad de la zona, con la construcción de bermas o bancos que permitan dar una pendiente adecuada. Remover los materiales en la cabeza de un deslizamiento, reduce las fuerzas impulsoras y aumenta la estabilidad, este método es adecuado para hacer cortes en suelos profundos donde se pueden dar deslizamientos.

**Bermas** la Implementación de bermas, en esta zona es fundamental, ya que es una de las formas más eficaces de protección contra los derrumbes, reducen la fuerza de tracción en las rocas de superficie y reducen las tasas de erosión superficial. También reducen la frecuencia de los desprendimientos de material. Y ayuda a disminuir las pendientes entre los taludes.

**Pernos pasivos con concreto lanzado** Se da una protección de la zona con un refuerzo de

pernos pasivos, junto con concreto lanzado y acero de refuerzo, que permita la estabilización del talud, con el corte previo del terreno. De tal manera que se genere una pared estabilizada con una pendiente adecuada y anclajes que ayuden a la reducción las fuerzas impulsoras del deslizamiento.

**Sistemas manejo de aguas** Es importante considerar la presión de poro en el terreno, debido a que cuando se da una reducción de la capa freática aumenta las fuerzas de resistencia y la estabilidad, y por el contrario cuando hay un aumento en la capa freática disminuye la resistencia y la estabilidad.

Por lo tanto, se recomienda un eficiente manejo de aguas en la zona. Se deben realizar cunetas que permitan controlar el agua superficial, principalmente en la parte superior del talud.

## Estación 34+770



Figura 55. Zona crítica, estación 34+770 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Geometría del Talud/Corte** Realizar un corte, eliminando la totalidad de materiales deslizados, de tal manera que se disminuya el ángulo del talud, ya que, al remover los materiales deslizados, o con características poco favorables, se reduce las fuerzas impulsoras y aumenta la estabilidad, este método es adecuado para hacer cortes en suelos profundos donde se pueden dar deslizamientos o existe la presencia de uno.

**Bermas** Construcción de bermas amplias, que permitan la estabilidad del talud, con dimensiones adecuadas que disminuyan significativamente las fuerzas entre los materiales y minimice el grado de erosión en la zona.

**Sistemas manejo de aguas** Se recomienda un eficiente manejo de aguas en la zona. Se deben realizar cunetas que permitan controlar el agua superficial, tanto en la parte superior del talud como intercaladas en cada una de las bermas, las cuales deben poseer un contrapendiente para dar dirección al agua desplazada.

Esto debido a que cuando se da una reducción de la capa freática aumenta las fuerzas de

resistencia y la estabilidad, y por el contrario cuando hay un aumento en la capa freática disminuye la resistencia y la estabilidad.

Aunque no se conoce el nivel de capa freática, la zona en estudio es una zona húmeda, con presencia de suelos en muchos casos saturados, debido a las lluvias y el clima variante.

**Revegetación** Cobertura vegetal densa, la revegetación reduce significativamente los procesos de erosión, esto se hace plantando diferentes tipos de arbustos que generan una cubierta vegetal que fortalece las raíces y mejora la estabilidad del suelo.

## Estación 36+130



Figura 56. Zona crítica, estación 36+130 Fuente: Asesorías GEOTEC.

**Geometría** Se debe realizar un movimiento de suelo con bermas amplias y una pendiente con una relación 1,5:1. Que permita brindar una estabilidad en el talud, debido al peso propio de este. Se debe retirar casi en su totalidad el material desplazado.

**Sistemas manejo de aguas** Sistema de conducción de aguas superficiales, alrededor del talud generado con los cortes, y en medio de las bermas, las cuales deben poseer un contrapendiente para dirigir el agua presente.

**Muro de gaviones** Se plantea la construcción de un muro de gaviones en el pie del talud para brindar soporte y mayor peso en esta zona, lo cual genera una mejor estabilidad del terreno.

Un muro de gaviones está compuesto por contenedores, con cajas de malla de alambre llenos de piedra de dimensiones entre 10 a 20 cm.

Es un sistema económico, fácil y rápido de construir. Poseen una gran flexibilidad por lo que soportan movimientos, debido a que el relleno del contenedor es muy permeable y permite un buen drenaje.

Estos sistemas funcionan debido a que la fricción entre las hieleras de los bloques individuales es muy alta, de igual forma entre la fila y el suelo. En suelos arcillosos se requiere contrafuertes adheridos al muro de gaviones para brindar mayor estabilidad.

**Revegetación** cobertura vegetal densa, la revegetación reduce significativamente los procesos de erosión, esto se hace plantando diferentes tipos de arbustos que generan una cubierta vegetal que fortalece las raíces y mejora la estabilidad del suelo.

# Planteamiento de sistemas de instrumentación para 13 zonas críticas:

Es de suma importancia dar seguimiento a las grandes obras de infraestructura, en este caso las obras de estabilización de laderas o taludes, es

por esto que a continuación se presenta una Cuadro con la instrumentación principal para el monitoreo básico de taludes.

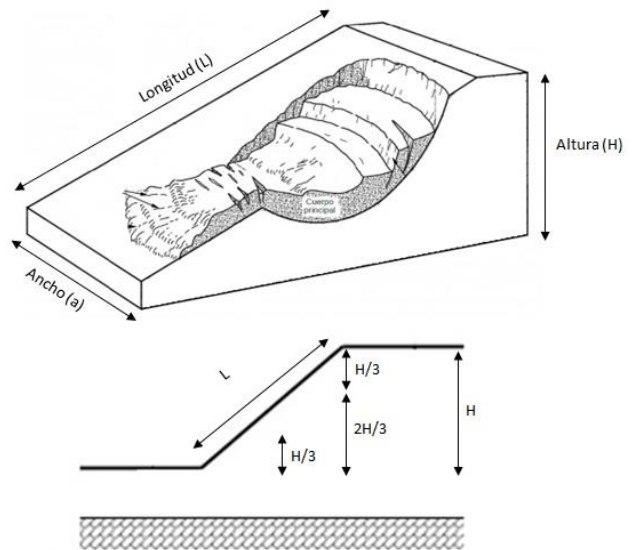
*Cuadro 18 Instrumentación de monitoreo para ruta 35, Sifón-La Abundancia.*

Parámetros	Tipo Instrumentación	Variable medición	Recolección Datos	Simbología
<b>Deslizamiento Superficial</b>	Testigos Superficiales	Movimientos y deformaciones en talud	Manual (equipo topográfico)	✕
<b>Deslizamiento Profundo</b>	Inclinómetro Vertical	Cambio de pendientes	Manual (Lector incluido)	▲
	Reflectómetro Dominio tiempo	Planos de falla y grietas	Automático	●
<b>Presiones intersticiales</b>	Tubería piezométrica ranurada	Presión de agua en poro	Manual	↓
	Piezómetro cerrado	Presión de agua en poro	Manual o Automático	↓
	Piezómetro Abierto	Presión de agua en poro	Manual o Automático	↓
	Piezómetro abierto de cuerda	presión de agua en poro	Manual o Automático	↓

Se tienen cuatro parámetros fundamentales de medición, los deslizamientos superficiales, los deslizamientos profundos, las presiones intersticiales y las presiones de empuje. Para esos cuatro parámetros de medición existe un tipo de instrumentación específica de la cual se puede obtener la información de manera manual o automática.

En la mayoría de los casos este tipo de instrumentación es fácil de instalar, de igual forma el precio de la instrumentación geotécnica mostrada anteriormente no es elevado. Por lo que se puede hacer un uso de estos instrumentos de manera que no afecte una buena distribución a lo largo y ancho de las dimensiones de los taludes estudiados. Al no ser el parámetro económico una limitante en este caso, por el bajo costo de la instrumentación especificada, se logra realizar una propuesta que permita verificar y corroborar las mediciones con instrumentaciones de diferente tipo, lo cual permite tener mayor certeza con el análisis de los datos obtenidos y por ende un mejor criterio para la toma de decisiones de acciones correctivas en caso de detectar anomalías o alteraciones en los terrenos o zonas

monitoreadas. A continuación, se muestra un esquema donde se muestran los parámetros geométricos de los taludes a considerar para la ubicación de la instrumentación.



*Figura 57. Esquema de dimensiones geométricas para talud. Fuente: Elaboración propia.*

### Estación 17+400

#### La zona en estudio presenta

- Fracturas visibles
- Evidencia movimiento
- Altura elevada
- Pendiente elevada
- Bermas poco funcionales

#### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
113	60	114	40% -70%

#### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
Alto	C	C	C

Clase C: La instrumentación se considera obligatoria.

Tipo de instrumento	Variable medición	Recolección datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Inclinómetro Vertical	Desplazamiento por ángulo de inclinación	Manual (Lector Incluido)
Piezómetro de cuerda vibrante	Presión de agua en poro	Manual o automático

#### Características

Debido a la presencia de materiales deslizados, se desea controlar el movimiento del talud de manera vertical y horizontal, los testigos superficiales son una opción económica que permiten medir este parámetro.

Al ser visible la falla es importante la implementación de inclinómetros que permitan medir la inclinación o desplazamiento respecto a esta falla.

A pesar de que no se presentan problemas de flujo de agua y se desconoce el nivel freático, la zona posee una alta humedad por lo que se debe medir la presión de poro, interna en el talud.

#### Especificaciones

Tipo	N°	Ubicación
Testigos Superficiales	8	Fila de 3 a cada 30 m de ancho, y 4 en la parte superior.
Inclinómetro Vertical	2	En la corona del Talud de 20 a 40 m
Piezómetro Abierto	2	En la corona a una profundidad de 15 m

#### Esquema

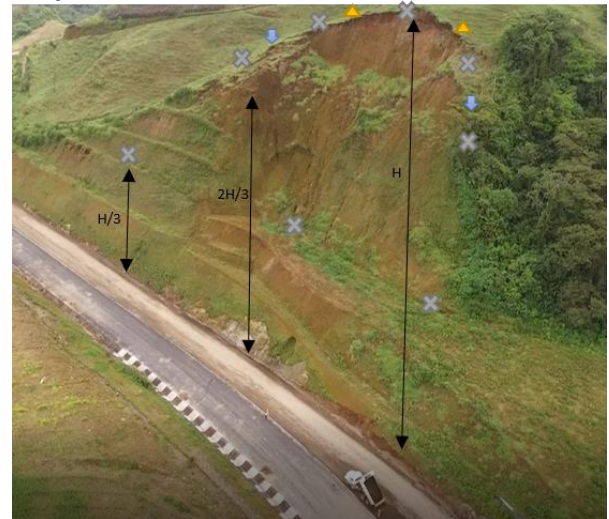


Figura 58. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 17+400.

Se colocan 1 fila desde 1/3 del pie con 3 testigos superficiales y 4 testigos alrededor de la corona del talud, con testigos superficiales a cada 30m cada uno de ancho, brinda un control de manera fácil y rápida de la existencia de movimientos en el talud, los puntos de control deben estar fuera de la zona inestable, para poder obtener las mediciones con el equipo topográfico de manera adecuada.

Se plantea la instalación de 2 inclinómetros verticales con una distancia entre ellos de 20 m, en la corona del talud, a una profundidad de 20 a 40 m anclados en los materiales de toba soldada, permitiendo medir cambios en la pendiente o inclinación del talud, el inclinómetro debe instalarse de manera que este en contacto con la falla, para una medición adecuada del movimiento.

El piezómetro debe ser de cuerda vibrante sirve para medir la presión de poro, se instala un piezómetro a una profundidad aproximada de 15 m debido a la altura del talud, debido a que se desconoce el nivel freático y por la altura elevada del talud. Es recomendable colocar en toba pumítica.

### Estación 18+600

La zona en estudio presenta:

- Desprendimientos materiales
- Altura elevada
- Pendiente elevada
- Bermas poco funcionales

Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
183	106	209	40% -55%

### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
Alto	C	C	C

Clase C: La instrumentación se considera obligatoria.

Tipo de instrumento	Variable medición	Recolección datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Inclinómetro Vertical	Desplazamiento o por ángulo de inclinación	Manual (Lector Incluido)
Piezómetro Abierto	Presión de agua en poro	Manual o automático

### Características

Debido al desprendimiento de materiales, y a la gran magnitud del talud, se desea controlar el movimiento del talud de manera vertical y horizontal, los testigos superficiales son una opción económica que permiten medir este parámetro y se pueden colocar en las bermas, debido a la gran longitud de este, formando una malla de puntos a medir. Al poseer materiales deslizados al margen derecho del talud, se podría deducir la existencia de una falla, por lo que la implementación de inclinómetros en esta área que permitan medir la inclinación o desplazamiento respecto a una falla se vuelve vital. Al existir abundantes salidas de agua en el talud y grandes problemas por condiciones hidrológicas se debe medir la presión de poro, ya que esto puede desencadenar un deslizamiento debido a las fuerzas internas generadas en el talud.

### Especificaciones

Tipo	N°	Ubicación
Testigos Superficiales	12	Malla de 3 filas, con 4 testigos a cada 30 m horizontales.
Inclinómetro Vertical	3	En la corona del Talud de 30 a 50 m profundidad
Piezómetro abierto	2	En la corona a una profundidad de 20 m

### Esquema

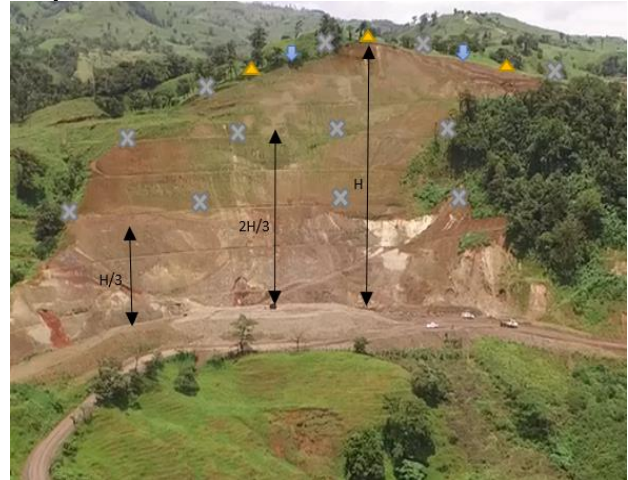


Figura 59. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 18+600.

**Aplicación** Debido a que es un talud de gran magnitud con bermas intermedias, se plantean 3 filas de testigos superficiales a cada 30 m, para un total de 4 testigos superficiales por fila. Esto con el objetivo de medir los desplazamientos de manera superficial, a  $H/3$ ,  $2H/3$  y la altura total del talud. Se colocan 3 inclinómetros en la corona del deslizamiento de manera que se pueda medir las deformaciones a profundidad y la existencia de una falla en la zona. Se recomiendan a una profundidad de 30 a 50 m ya que no se conoce con exactitud la ubicación de la falla. Se recomienda la colocación en la brecha basal o brecha media, debido a las dimensiones del talud presente, ya que posee una gran altura y longitud. Se colocan dos piezómetros en la corona, a una profundidad aproximada de 20 m debido a la altura del talud, esto con el objetivo de medir las presiones de poro en el terreno. Debido a la presencia de lluvias y humedad en la zona por condiciones climáticas, se recomienda la colocación en los conglomerados y tobas pumíticas.

## Estación 19+800

### La zona en estudio presenta

- Talud de Corte
- Evidencia movimiento
- Deslizamientos materiales
- Presencia grietas y fallas.
- Condiciones hidrológicas negativas

### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
32	55	103	40% -65%

### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
<b>Alto</b>	C	C	<b>C</b>

Clase C: La instrumentación se considera obligatoria.

Tipo	Variable medición	Recolección datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Reflectómetro Dominio Tiempo	Planos fallas y grietas. Contenido de agua.	Automático

### Características

Por la formación de grietas en la vía, movimientos visibles en el talud, se plantea la utilización de una malla de testigos superficiales para medir el movimiento vertical y horizontal del talud.

Debido a las fallas y grietas observadas en la zona, se recomienda la implementación de reflectómetros de dominio tiempo, ya que son instrumentos utilizados para determinar los planos de falla en una zona inestable y el contenido de agua.

### Especificaciones

Tipo	N°	Ubicación
Testigos Superficiales	3	Malla de 1 filas vertical, con 3 testigos a cada 12 m horizontales.
Reflectómetro Dominio Tiempo	2	En la corona del Talud, profundidad 15 m.

### Esquema



Figura 60. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 19+800.

### Aplicación

Debido a la altura de la zona en estudio se colocan 1 fila de testigos con 3 testigos a una distancia de 12 m cada uno. Para medir los deslizamientos superficiales en la zona.

Se puede colocar una mayor cantidad de testigos formando una malla de mayor magnitud con testigos a cada 30 m a lo largo de la zona tomando en cuenta la zona 19+800 y 20+050, de manera que se pueda medir los movimientos en conjunto donde se generó un corte según geometría de diseño para la construcción de la carretera.

Se propone la instalación de dos TDR a una profundidad de 15 m, en la parte superior de la corona del deslizamiento en el talud, los cuales permiten medir los planos de falla, los deslizamientos internos y el contenido de agua. Se deben colocar a una profundidad la cual este en contacto con las fallas presentes generadas por los desplazamientos de los materiales de igual forma para poder medir el contenido de humedad de manera correcta.

## Estación 20+050

### La zona en estudio presenta:

- Talud de Corte
- Evidencia movimiento
- Deslizamientos materiales
- Presencia grietas y fallas.
- Condiciones hidrológicas negativas

### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
34	56	154	30% -60%

### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
Alto	C	C	C

Clase C: La instrumentación se considera obligatoria.

Tipo de instrumento	Variable medición	Recolección datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Reflectómetro Dominio Tiempo	Planos fallas y grietas. Contenido de agua.	Automático

### Características

Por la formación de grietas en la vía, movimientos visibles en el talud, deslizamientos antiguos, se plantea la utilización de una malla de testigos superficiales para medir el movimiento vertical y horizontal del talud. Debido a las fallas y grietas observadas en la zona, se recomienda la implementación de reflecto metros de dominio tiempo, ya que son instrumentos utilizados para determinar los planos de falla en una zona inestable y el contenido de agua.

### Especificaciones

Tipo	Cantidad	Ubicación
Testigos Superficiales	3	Malla de 1 filas vertical, con 3 testigos a cada 12 m horizontales.
Reflectómetro o Dominio Tiempo	2	En la corona del Talud profundidad 15m.

### Esquema



Figura 61. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 20+050.

### Aplicación

Debido a la altura de la zona en estudio se colocan 1 fila de testigos con 3 testigos a una distancia de 12 m cada uno. Para medir los deslizamientos superficiales en la zona.

Se puede colocar una mayor cantidad de testigos formando una malla de mayor magnitud con testigos a cada 30 m a lo largo de la zona tomando en cuenta la zona 19+800 y 20+050, de manera que se pueda medir los movimientos en conjunto de toda la zona donde se generó un corte según geometría de diseño para la construcción de la carretera.

Debido a que se observan grietas en el talud y en la carretera se proponen dos TDR, a una profundidad de 15 m los cuales permiten medir los planos de falla, los deslizamientos internos y el contenido de agua. Se deben introducir a una profundidad adecuada de tal manera que estos estén en contacto con la falla de tal manera que se pueda dar una medición adecuada.

Los instrumentos de Reflectómetro dominio tiempo son capaces de medir el contenido de agua o la humedad presente en el terreno, por lo tanto, estos instrumentos me permiten identificar que tan saturados están los suelos.

## Estación 20+800

### La zona en estudio presenta

- Fracturas y grietas visibles
- Mega deslizamiento.
- Condiciones hidrológicas negativas
- Flujos de agua
- Suelos consistencia blanda

### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
235	42	114	30% -55%

### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
Alto	C	C	C

Clase C: La instrumentación se considera obligatoria.

Tipo de instrumento	Variable medición	Recolección datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Inclinómetro Vertical	Desplazamiento o por ángulo de inclinación	Manual (Lector Incluido)
Piezómetro Abierto	Presión de agua en poro	Manual o automático
Reflectómetro Dominio Tiempo	Planos fallas y grietas. Contenido de agua.	Automático

### Características

Al ser un mega deslizamiento, la zona afectada es de gran magnitud, al generar una solución como prioridad, se debe monitorear, debido a la cercanía de la cuenca y las características de la zona.

Se plantea una malla de testigos superficiales, por la longitud de la zona, de manera que sea fácil y rápida la toma de datos, sobre la afectación de movimientos verticales y horizontales. Inclinómetros debido a que se pretende medir los cambios en la pendiente, que determinan algún tipo de falla o movimiento en la zona de manera interna. Los reflectómetro de dominio tiempo permiten determinar los planos de falla y el

contenido de agua. Por lo que en esta zona es fundamental determinar los planos de falla, ya que implican movimientos exagerados de material.

Los piezómetros permiten determinar la presión de poro interna, en el terreno en este caso es de gran importancia ya que se presentan condiciones hidrológicas negativas.

### Especificaciones

Tipo	N°	Ubicación
Testigos Superficiales	10	Mallado de testigos superficiales con 10 testigos a cada 45 m de ancho cada uno
Inclinómetro Vertical	4	En la corona del Talud a 25m
Piezómetro	3	En la corona a una profundidad de 30 m
Reflectómetro Dominio Tiempo	2	En la corona a una profundidad de 30 m

### Esquema

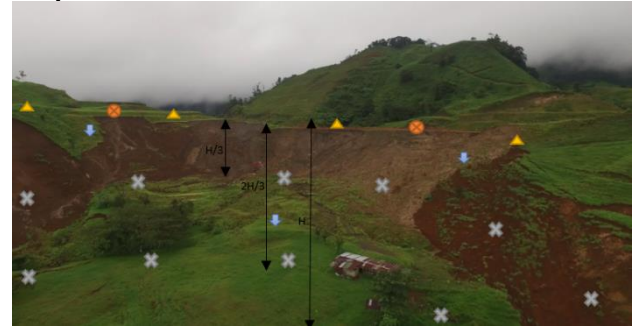


Figura 62. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 20+800.

### Aplicación

Se colocan 10 testigos superficiales a cada 45 m de espaciamiento entre cada uno. Las filas están a una distancia de 15 m aproximadamente, colocados de preferencia en bermas.

Los 4 inclinómetros verticales y los 2 reflectómetro se deben colocar en la corona de los taludes generados, o donde exista presencia de falla, esto para medir la inclinación y la falla generada en la zona.

Se colocan 3 piezómetros en la parte superior del talud, a diferentes profundidades, para determinar y comparar la presión de poro en diferentes puntos.

## Estación 21+050

### La zona en estudio presenta

- Presencia fallas
- Evidencia de grietas
- Procesos hidrotermales
- Pendiente elevada
- Problemas de escombrera

### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
127	44	95	50% -80%

### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
Alto	C	C	C

Clase C: La instrumentación se considera obligatoria.

Tipo	Variable medición	Recolección de datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Inclinómetro Vertical	Desplazamiento o por ángulo de inclinación	Manual (Lector Incluido)
Piezómetro Abierto	Presión de agua en poro	Manual o automático
Reflectómetro o Dominio Tiempo	Planos fallas y grietas. Contenido de agua.	Automático

### Características

Los testigos superficiales son instrumentos de bajo costo, que permiten medir movimientos ya sea horizontal o vertical de manera superficial, por lo que la implementación de estos es importante, debido a la evidencia de movimiento.

Los inclinómetros miden la inclinación o movimientos internos debido a fallas. Permiten monitorear el cambio de pendiente en los taludes o laderas. Por los procesos hidrotermales generados en la zona es recomendable medir la presión de poro, por las condiciones hidrogeológicas, que varían y afectan la estabilidad de la zona, desencadenando deslizamientos.

### Especificaciones

Tipo	Cantidad	Ubicación
Testigos Superficiales	9	Malla de 3 filas verticales, con 3 testigos a cada 30 m horizontales.
Inclinómetro Vertical	2	En corona del talud profundidad de 20 m
Piezómetro Abierto	2	En la corona a una profundidad de 15 m
Reflectómetro Dominio Tiempo	2	En la corona a una profundidad de 25 a 35 m

### Esquema

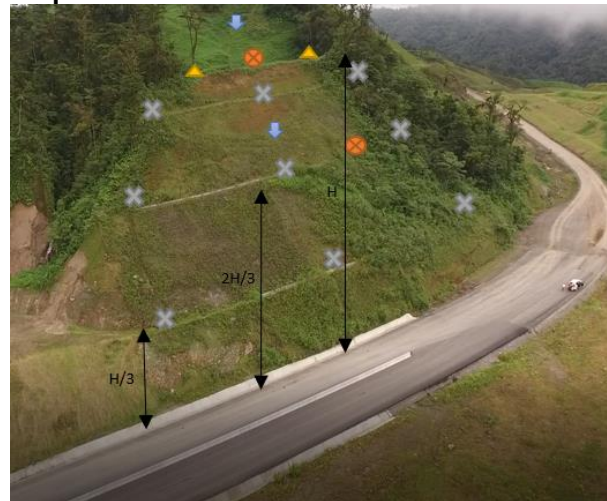


Figura 63. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 21+050.

### Aplicaciones

Se colocan una malla de 9 testigos superficiales, en 3 filas de 3 testigos a cada 30 m de espaciamiento entre cada uno. Las filas están a una distancia vertical de  $H/3$ ,  $2H/3$  y  $H$  aproximadamente, colocados de preferencia en bermas. Los 2 inclinómetros verticales se deben colocar en la corona de los taludes generados, o donde exista presencia de falla, esto para medir la inclinación y la falla generada en la zona, a una profundidad de 20 m.

Es importante la colocación de reflectómetro dominio tiempo para determinar los planos de fallas y grietas y los movimientos internos generados. Se colocan 2 piezómetros en la parte superior del talud, a una profundidad de 15 m para determinar y comparar la presión de poro en diferentes puntos.

### Estación 21+640

#### La zona en estudio presenta:

- Evidencia movimiento
- Focos de inestabilidad
- Pendiente elevada
- Bermas poco funcionales

#### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
24	19	29	50% -70%

#### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
Alto	C	C	C

Clase C: La instrumentación se considera obligatoria.

Tipo	Variable medición	Recolección datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Inclinómetro Vertical	Desplazamiento o por ángulo de inclinación	Manual (Lector Incluido)
Reflectómetro o Dominio Tiempo	Planos fallas y grietas. Contenido de agua.	Automático

#### Características

Debido a los movimientos de materiales, en este caso desprendimientos, se desea controlar el movimiento del talud de manera vertical y horizontal, los testigos superficiales son una opción económica que permiten medir este parámetro.

Es importante la implementación de inclinómetros que permitan medir la inclinación o desplazamiento respecto a una falla. Esto de manera que permita verificar el grado de inestabilidad de la zona, por la altura de la zona y la cercanía a la carretera.

#### Especificaciones

Tipo	Cantidad	Ubicación
Testigos Superficiales	4	Dos filas con dos testigos superficiales a una distancia de 12 m.
Inclinómetro Vertical	1	En la corona del talud 15m
Reflectómetro Dominio Tiempo	2	En la corona a una profundidad de 10 m

#### Esquema



Figura 64. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 21+640.

#### Aplicaciones

Se colocan 2 filas con 2 testigos superficiales a una distancia aproximada de 12 m cada una. A  $H/3$  y en la parte superior del talud  $H$ , esto debido a las dimensiones determinadas en la mayor zona de afectación.

De igual forma se coloca un inclinómetro en la corona del talud, a una profundidad de 15 m, para determinar cambios en el grado de inclinación del talud, y para determinar planos de fallas o grietas que se generen en la zona. Se recomienda colocar dos reflectómetro dominio tiempo para determinar los planos de fallas y con esto los movimientos internos.

La instrumentación anterior se recomienda colocar o anclar en los materiales clasificados como: tobitas, presentes en la zona.

### Estación 29+100

#### La zona en estudio presenta

- Talud de Corte
- Evidencia movimiento
- Altura elevada
- Pendiente elevada
- Condiciones hidrológicas negativas.

#### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
131	44	168	25% -35%

#### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
Alto	C	C	C

Clase C: La instrumentación se considera obligatoria.

Tipo	Variable medición	Recolección de datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Inclinómetro Vertical	Desplazamiento o por ángulo de inclinación	Manual (Lector Incluido)
Piezómetro Abierto	Presión de agua en poro	Manual o automático

#### Características

Al ser una zona inestable, con presencia de deslizamiento y poseer una altura elevada, es importante medir los desplazamientos verticales y horizontales, para poder realizar un análisis al respecto y poder prevenir deslizamientos futuros.

Al existir un deslizamiento se evidencia la zona de falla, por lo que es importante medir la inclinación o cambios en el ángulo de la pendiente de la zona, esto se realiza por medio de un inclinómetro vertical.

Al ser una zona húmeda con presencia de condiciones hidrológicas negativas se recomienda la colocación de piezómetros de cuerda vibrante para determinar la presión de poro a lo interno del terreno.

#### Especificaciones

Tipo	Cantidad	Ubicación
Testigos Superficiales	11	2 filas de 8 testigos a una distancia de 30 m. y 3 en la parte superior del talud
Inclinómetro Vertical	2	En la corona del talud Profundidad de 25m
Piezómetro Abierto	3	En la corona a una profundidad de 12, a 35 m

#### Esquema



Figura 65. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 29+100.

#### Aplicaciones

Se colocan 2 filas desde H/3 del pie hasta alrededor de la corona del talud, con testigos superficiales a cada 30m aproximadamente, brinda un control de manera fácil y rápida de la existencia de movimientos en el talud, los puntos de control deben estar fuera de la zona inestable, para poder obtener las mediciones con el equipo topográfico de manera adecuada. Se plantea la instalación de 2 inclinómetros verticales con una distancia entre ellos de 20 m, en la corona del talud, permitiendo medir cambios en la pendiente o inclinación del talud, el inclinómetro debe instalarse de manera que este en contacto con la falla, para una medición adecuada del movimiento, a una profundidad de 25 m. Se recomienda instalar 3 piezómetros, los cuales debe ser de cuerda vibrante sirve para medir la presión de poro, se instala un piezómetro a una profundidad aproximada de 12m, 25 m y 35 m debido a la altura del talud, debido a que se desconoce el nivel freático y por la altura elevada del talud. Se recomienda la colocación de los piezómetros en los materiales clasificados como toba pumítica.

### Estación 30+700

#### La zona en estudio presenta

- Flujo de barro y deslizamiento de material
- Grietas visibles
- Altura elevada
- Pendiente elevada
- Bermas poco funcionales
- Flujos de agua
- Condiciones hidrológicas negativas.

#### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
103	35	102	30% -45%

#### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
<b>Alto</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>

Clase C: La instrumentación se considera obligatoria.

Tipo	Variable medición	Recolección datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Inclinómetro Vertical	Desplazamiento o por ángulo de inclinación	Manual (Lector Incluido)
Piezómetro Abierto	Presión de agua en poro	Manual o automático

#### Características

Debido a la presencia de deslizamientos antiguos, y flujos de lodo, así como las condiciones globales de la zona que indican la existencia de un mega deslizamiento en la zona, se recomienda el monitoreo de los movimientos horizontales y verticales superficiales por medio de los testigos superficiales. Por la gran altura, la pendiente elevada, y la evidencia de fracturas se recomienda la instalación de inclinómetros en la parte superior de la zona de manera que se evidencie en los datos los movimientos internos debido al cambio de pendiente o el grado de inclinación del talud.

Los piezómetros deben instalarse debido a que es una zona con presencia de hidrotermalismo, con flujos de agua visibles, aunque no se encontró nivel freático, es una zona saturada por lo que

puede generar mayores presiones internas en la zona.

#### Especificaciones

Tipo	Cantidad	Ubicación
Testigos Superficiales	15	Malla de 3 filas, con 5 testigos a cada 20 m
Inclinómetro Vertical	3	A cada 30 m en la corona del talud
Piezómetro	2	corona del talud a 25 m profundidad

#### Esquema



Figura 66. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 30+700.

#### Aplicaciones

Se recomienda colocar 3 filas desde  $H/3$ ,  $2H/3$  y  $H$  del pie hasta la corona del talud, con 5 testigos superficiales a cada 20m, para brindar un control de manera fácil y rápida de la existencia de movimientos en el talud, los puntos de control deben estar fuera de la zona inestable, de tal manera que permita tomar los datos de una manera correcta. Se plantea la instalación de 3 inclinómetros verticales con una distancia entre ellos de 30 m, en la corona del talud, se debe instalar de manera que el inclinómetro este en contacto con la falla, para una medición adecuada del movimiento. El piezómetro debe ser de cuerda vibrante sirve para medir la presión de poro, se instalan dos piezómetros a una distancia de 35 m a una profundidad aproximada de 25 m debido a la altura del talud, debido a que se desconoce el nivel freático y por la altura elevada del talud.

### Estación 31+100

#### La zona en estudio presenta

- Talud de Corte
- Altura elevada
- Pendiente elevada
- Bermas

#### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
145	72	123	60% -80%

#### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
Alto	C	C	C

Clase B: recomendable instalación de instrumentación para garantizar o verificar estabilidad o inestabilidad de talud/ladera.

Tipo	Variable medición	Recolección datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Piezómetro Abierto	Presión de agua en poro	Manual o automático

#### Características

Al ser un talud de corte y poseer una altura elevada, se propone el monitoreo de este por medio de testigos superficiales para determinar movimientos verticales y horizontales, de tal manera que se aprovechen las bermas construidas y estables. Los testigos forman una malla para la toma de datos desde bases que estén fuera de la zona en estudio con posibilidad de sufrir algún tipo de inestabilidad.

De igual forma debido a la humedad de la zona y a la inexistencia de sistemas de manejo de aguas o drenajes, se recomienda la instalación de piezómetros, para medir las presiones internas generadas por el agua como lo es la presión de poro en el terreno. Se recomienda la utilización de más de un piezómetro para realizar la comparación de los datos obtenidos.

#### Especificaciones

Tipo	Cantidad	Ubicación
Testigos Superficiales	13	Malla de 2 filas con 5 testigos a cada 30 m y 3 en la parte superior
Piezómetro	2	En la corona del talud a una profundidad de 30m a 40m

#### Esquema



Figura 67. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 31+100.

#### Aplicaciones

Se plantea la colocación de testigos superficiales de manera que formen una malla de 2 filas verticales desde  $H/3$  hasta  $2H/3$  del pie del talud hasta la parte superior del talud, colocando 3 testigos superficiales en la cabeza del talud. Cada fila posee 5 testigos a una distancia aproximada de 30 m, esto con el objetivo de tener una distribución a lo largo y ancho de la zona en estudio.

Los piezómetros se colocan a cada 30 m en la corona del talud, a una profundidad de 30 m a 40 m debido a la altura del talud, para determinar la presión de poro interna en el terreno.

### Estación 33+800

#### La zona en estudio presenta

- Focos de inestabilidad
- Evidencia movimiento
- Altura elevada
- Pendiente elevada
- Bermas poco funcionales
- Peso del talud

#### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
41	34	82	45% -60%

#### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
<b>Medio</b>	B	<b>B</b>	C
Alto	C	C	C

Clase B: recomendable instalación de instrumentación para garantizar o verificar estabilidad o inestabilidad de talud/ladera.

Tipo	Variable medición	Recolección de datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Inclinómetro Vertical	Desplazamiento o por ángulo de inclinación	Manual (Lector Incluido)
Piezómetro Abierto	Presión de agua en poro	Manual o automático

#### Características

Por la presencia de focos de inestabilidad en la zona, la evidencia de movimientos y la altura del talud, se plantea una malla de testigos superficiales que permita medir los movimientos tanto horizontal como verticalmente a lo largo de la zona.

Es necesario medir los desplazamientos internos, ocasionados por fallas internas, para esto se colocan inclinómetros verticales, que midan el cambio de pendiente en el talud ocasionado por los desplazamientos o deformaciones internas. Es importante que el inclinómetro se coloque dónde está la falla en caso de que esta sea visible, en caso de no observarse la falla se coloca en la parte superior o en la corona del talud.

#### Especificaciones

Tipo	Cantidad	Ubicación
Testigos Superficiales	6	Malla de 2 filas con 3 testigos a cada 14 m
Inclinómetro Vertical	2	En la corona del talud a profundidad 20m
Piezómetro	3	En la corona del talud a una profundidad de 10 m

#### Esquema



Figura 68. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 33+800.

#### Aplicaciones

Se plantea la colocación de testigos superficiales de manera que formen una malla de 2 filas verticales desde 1/3 del pie del talud hasta la parte superior del talud. Cada fila posee 3 testigos a una distancia aproximada de 14 m, esto con el objetivo de tener una distribución a lo largo y ancho de la zona en estudio.

Se plantea la instalación de 2 inclinómetro vertical en la corona del talud, a una profundidad de 20 m anclados a la brecha, se debe instalar de manera que el inclinómetro este en contacto con la falla, para una medición adecuada del movimiento.

Se instalan tres piezómetros para determinar la presión de poro interna, la cual puede contribuir al deslizamiento por el peso que aporta al talud. Se colocan en la parte superior a una profundidad de 10 m colocándose en los materiales clasificados como tobitas.

### Estación 34+770

#### La zona en estudio presenta

- Alteración hidrotermal
- Condiciones hidrológicas negativas
- Presencia de fallas
- Altura elevada
- Pendiente elevada

#### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
49	28	54	40% -65%

#### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
<b>Medio</b>	B	<b>B</b>	C
Alto	C	C	C

Clase B: recomendable instalación de instrumentación para garantizar o verificar estabilidad o inestabilidad de talud/ladera.

Tipo	Variable medición	Recolección datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Inclinómetro Vertical	Desplazamiento o por ángulo de inclinación	Manual (Lector Incluido)
Piezómetro	Presión de agua en poro	Manual o automático

#### Características

La zona estudiada presenta una altura y pendiente elevada, es por esto que se plantea la colocación de testigos superficiales a manera de monitorear la inestabilidad de la zona, por medio de movimientos superficiales (verticales y horizontales) visibles en la zona. Se colocan los testigos superficiales de manera que formen una malla, de la cual se puedan tomar los datos con equipo topográfico desde zonas de control fuera de la zona en estudio.

Por la presencia evidente de fallas, se plantea la instalación de inclinómetros verticales, que permitan medir los deslizamientos internos en la falla y el cambio en el grado de inclinación del talud. Esta zona se ve afectada por condiciones de humedad elevadas, cambios hidrológicos y procesos hidrotermales, por lo que es de gran importancia medir la presión de poro interna en el terreno, ya que es un factor desencadenante de deslizamiento.

#### Especificaciones

Tipo	Cantidad	Ubicación
Testigos Superficiales	9	Malla de 3 filas con 3 testigos a cada 16 m
Inclinómetro Vertical	1	Corona del talud a una profundidad de 20 m
Piezómetro de cuerda vibrante	2	Parte superior del talud de 10 a 20 m profundidad

#### Esquema



Figura 69. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 34+770.

#### Aplicación

Se recomienda colocar 3 filas desde 1/3 del pie hasta la corona del talud, con 3 testigos superficiales a cada 16m, para brindar un control de manera fácil y rápida de la existencia de movimientos en el talud, los puntos de control deben estar fuera de la zona inestable, de tal manera que permita tomar los datos de una manera correcta. Se plantea la instalación de 1 inclinómetros verticales en la corona del talud a una profundidad de 20 m, se debe instalar de manera que el inclinómetro este en contacto con la falla, para una medición adecuada del movimiento. Se recomienda anclar el inclinómetro en la toba pumítica. Se instala un piezómetro a una profundidad aproximada de 10 a 20 m debido a la altura del talud, El piezómetro debe ser de cuerda vibrante sirve para medir la presión de poro y se debe colocar en la brecha lávica alterada.

### Estación 36+130

#### La zona en estudio presenta

- Talud de corte
- Deslizamientos
- Condición suelo saturado
- Fuertes agrietamientos
- Altura elevada
- Pendiente elevada

#### Características Talud

Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Rango Pendiente
45	20	54	35% -75%

#### Instrumentación de monitoreo

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
Alto	C	C	C

Clase C: La instrumentación se considera obligatoria.

Tipo	Variable medición	Recolección datos
Testigos Superficiales	Movimiento en talud	Manual (Equipo topográfico)
Inclinómetro Vertical	Desplazamiento o por ángulo de inclinación	Manual (Lector Incluido)
Reflectómetro o Dominio Tiempo	Planos fallas y grietas. Contenido de agua.	Automático
Piezómetro	Presión de agua en poro	Manual o automático

#### Características

La zona es un talud de corte, realizado por diseño geométrico para la construcción de la carretera, con presencia de deslizamiento de gran magnitud, es importante medir los movimientos superficiales, horizontales y verticales por medio de testigos superficiales que permitan obtener los valores y observar la evidencia de daños causados por movimientos en la zona. Se recomienda instalar inclinómetros verticales y Reflectómetro de dominio tiempo para medir los movimientos o deformaciones internas en el terreno, colocando estos donde existe evidencia de grietas o fallas.

Por la condición saturada de la zona y la presencia de un nivel freático en los estratos superficiales se recomienda la instalación de instrumentación para medir la presión de poro

interna, que genera fuerzas intersticiales que impulsa el deslizamiento. Los reflectómetro de dominio tiempo permiten medir el contenido de agua o humedad en el terreno, otra razón por la que es importante la implementación de estos instrumentos en la zona.

#### Especificaciones

Tipo	Cantidad	Ubicación
Testigos Superficiales	6	Malla de 2 filas 3 testigos a cada 15 m
Inclinómetro Vertical	1	Corona del talud
Piezómetro de cuerda vibrante	1	Parte superior del talud
Reflectómetro o Dominio tiempo	2	Coronad el talud a 30 m de separación

#### Esquema



Figura 70. Ubicación de instrumentación para zona crítica en estación 36+130.

#### Aplicación

Se recomienda colocar 2 filas con 3 testigos superficiales a cada 15 m, para brinda un control de manera fácil y rápida de la existencia de movimientos en el talud. Se plantea la instalación de 1 inclinómetros verticales en la corona del talud a una profundidad de 10 m. Así como la instalación de 2 Reflectómetro dominio tiempo TDR en la corona del talud a una distancia de 30 m de separación entre ellos, que permita medir los planos de falla y comparar los datos obtenidos entre ellos. Se instala un piezómetro a una profundidad aproximada de 10 m debido a la altura del talud y el nivel freático superficial

# Análisis de los resultados

El desarrollo de este trabajo se inició eligiendo la obra de infraestructura vial, carretera nacional ruta 35, la cual permitió el estudio y seguimiento de las zonas vulnerables específicamente en el tramo central. La primera etapa permitió la identificación de 49 zonas vulnerables, el 67% de estas zonas presenta deslizamientos de diferentes magnitudes, 41% han sido intervenidas con diferentes métodos de estabilización de taludes o laderas, de las cuales un 16% no han sido efectivas evidenciado por el deslizamiento de materiales y la falla de las estructuras construidas, lo que muestra una problemática general que no se ha podido controlar por falta de investigación y análisis en las etapas previas y sistemas de control, monitoreo y mantenimiento durante la ejecución del proyecto.

De acuerdo con el mapa geográfico, la distribución de las zonas afectadas se da uniformemente en la totalidad del tramo central, del kilómetro 15+000 al 22+000 se determina una de las zonas con mayor problemática, donde se evidencian deslizamientos continuos en distancias muy cortas, de igual forma del kilómetro 24+000 al 34+000. Se evidencia en el mapa geográfico el cambio del alineamiento de la carretera con respecto al diseño original debido a los deslizamientos y la alta inestabilidad del terreno, implicando a la vez pérdidas económicas y extendiendo los periodos en la ejecución de las obras. El tramo de la carretera cuenta con 18 cortes de drenajes (cuencas, riachuelos, entre otros) cercanos a las zonas vulnerables, que promueven los deslizamientos debido a la humedad que aportan y a la socavación que causa el flujo del agua. De igual forma los fenómenos de deslizamientos se asocian al relieve por tratarse de relieves de montañosa con elevaciones de gran magnitud y abundantes cuencas como se observa en el mapa realizado,

afectando las vías con cortes y rellenos formando taludes de grandes extensiones.<sup>5</sup>

Analizando la problemática por medio de la afectación de la vía, según la Gráfica 1, un 35% del total de zonas identificadas no presenta ningún tipo de afectación mientras que un 57% de las zonas identificadas presenta materiales deslizados en la vía y un 65% daños en las cunetas, siendo mayor los porcentajes de afectación leves, por otra parte, un 20% de estas zonas obstruyen el paso de la vía, debido a la caída de bloques y material constante. Las zonas vulnerables presentan daños, los cuales afectan la carretera y propiedades vecinas (territorios privados), en un 14% así como un 4% de las zonas presentan daños en vías secundarias, que comunican al resto de las zonas con la carretera principal en construcción.

En la segunda etapa del proyecto se determinaron las causas de afectación del territorio, realizando un estudio específico en las 13 zonas más críticas según la afectación y magnitud.

Se realizó el estudio de la zona por medio del análisis de fotografías y videos aéreos, que permitieron observar el relieve y la topografía irregular, con una fila de montañas con fuertes pendientes y diferentes fenómenos desde una perspectiva global.

Se localizaron zonas afectadas, taludes de gran magnitud, caminos existentes, quebradas y ríos, presentando mayores problemas las zonas laterales a la quebrada Yeguas y la quebrada Laguna, confirmado por estudios previos realizados en la zona.<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> Ing. Alicia Alpízar Barquero (2012) *Metodología de análisis de estabilidad de taludes para Proyectos viales*. XI Congreso Nacional de Geotecnia, Congeo. San José Costa Rica.

<sup>6</sup> Gastón Laporte Molina & Jorge Arturo Herrera. (2009). *Evaluación Geológica y Geotécnica zonas inestables 21+780*. San José, Costa Rica.

Con la inspección y el estudio de la zona se determinaron factores condicionantes y desencadenantes, que se explican a continuación:

Según el tipo de relieve, clasificado como montañoso según caracterización de las zonas identificadas en sitio, el relieve es un factor que brinda condiciones que promueven el deslizamiento, ya que en terrenos montañosos la inestabilidad es mayor debido a que controla la distribución del peso del terreno, parámetros como la pendiente y la geometría de la zona aumentan la vulnerabilidad e inestabilidad.

Un 85% de las zonas estudiadas presentan problemas de geometría ya sea por la altura o el grado de inclinación, como se observa en el Cuadro 43 en la sección de apéndice 4 la mayoría de las pendientes varían entre valores de 30% a 80% y alturas desde 20 m a 110 m.

Se puede determinar la vulnerabilidad de los materiales en una condición no drenada, con respecto al ángulo de inclinación del terreno, y del ángulo de fricción de los materiales presentes en un talud o ladera<sup>7</sup> para garantizar la estabilidad del talud, esto se logra con la comparación de estos valores, ya que el ángulo de fricción del suelo debe ser como mínimo igual o mayor al ángulo de inclinación del terreno, esto para obtener un factor de seguridad igual o mayor a uno (FS=1) según código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica, de maneja que garantice una vulnerabilidad moderada o baja, para el caso de suelos que su resistencia este dada únicamente por fricción en condición drenada.

Una pendiente con una relación H: V de 1:1 en suelos con ángulo de fricción bajos genera una inestabilidad muy alta, los rangos de pendientes de 60% en adelante generan mayor vulnerabilidad, mientras que las pendientes entre 30% a 40% o menores generan vulnerabilidades bajas.

Según Luis L. Gonzales de Vallejos (2002) los taludes con pendientes elevadas en conjunto con materiales o estratos susceptibles a movimientos o con presencia de movimientos

antiguos se clasifican con una mayor inestabilidad que aquellos que poseen una pendiente menor.<sup>8</sup>

Otro de los factores importantes en la segunda etapa, es la litología presente en las zonas estudiadas, considerando las características geológicas y geotécnicas.

Un 69% de las 13 zonas estudiadas posee materiales con características negativas, ya que se ven afectadas por el tipo de materiales presentes en la zona, al poseer características o propiedades de baja calidad y resistencia, suelos blandos poco cohesivos en su mayoría de origen volcánicos, presentan granulometrías muy finas, entre arenas, limos y arcillas, lo cual es un factor común según la matriz de unidades geológicas y granulometría de materiales realizada.

Las unidades geológicas presentes en las zonas críticas son en su mayoría: tobas, brechas y lavas de diferentes tipos, así como suelos quemados y paleosuelos que generan niveles de agua colgados que agravan la situación de la zona.

La mayoría de los suelos presentes en la zona son de origen volcánico<sup>9</sup>, estos son materiales con una granulometría entre arenas, limos y arcillas, con tamaños de partícula que rondan entre 4,75 mm a 0,075 mm o menores, identificados como materiales blandos ya que son arenas sueltas, y arcillas poco consolidadas con altas relaciones de vacío y humedad.

Los limos presentes poseen una alta plasticidad, lo que permite la deformación de los materiales sin regresar a su estado original, esto se puede comprobar debido al gran contenido de humedad y un porcentaje de limite liquido mayor a 50% en los ensayos realizados a las muestras obtenidas de perforaciones en campo de las zonas estudiadas<sup>10</sup>, estos materiales a su vez sufren procesos de meteorización que desgastan y desmejoran sus propiedades físicas y mecánicas.

Se pudo obtener evidencia de materiales meteorizados en todas las zonas, por lo que la

---

<sup>7</sup> Álvaro Ulloa Calderón Y William Vargas Monge. (2007) *Vulnerabilidad Geotécnica, Metodología Simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carretera de montaña de Costa Rica*. Lanamme UCR. Universidad de Costa Rica.

---

<sup>8</sup> Luis L. Gonzales de Vallejo, M. F. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

<sup>9</sup> Murcia H.F, Borrero C.A, Pardo N., Alvarado G.E, Arnosio M. & Scolamacchia T. (2013). *Depósitos volcánicoclasticos: términos y conceptos para una clasificación en español*. - Revista Geológica de América Central.

<sup>10</sup> Luis L. Gonzales de Vallejo, M. F. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

meteorización es uno de los factores comunes, que se da por diferentes agentes externos o internos, como lo es la composición química, muchos materiales están compuestos de minerales que al alterarse modifican los depósitos en cuanto a dureza, capacidad y porosidad, las discontinuidades en el terreno favorecen la penetración del agua en el material, la topografía favorece el arrastre del material y el clima que viene siendo el agente más importante en la meteorización de los materiales en este caso, afecta en gran magnitud la meteorización de los materiales y por ende el proceso de erosión por el arrastre de los materiales, una vez que se genera la erosión se vuelve un factor desencadenante, al realizar cambios en el relieve y en la morfología de la zona se genera el movimiento del terreno, debido al cambio en las presiones y fuerzas internas.

La erosión es un proceso que se ve impulsado por la meteorización y otros agentes externos, es un factor visible en la totalidad de las zonas críticas estudiadas. Se evidencia la erosión por materiales desgastados, con diferente coloración y arrastrados o removidos de capas superiores que han sido desplazadas por el mismo fenómeno, parte de la erosión de los materiales se da debido a la deforestación causada por los cortes de diseño geométrico para la construcción de la carretera.

La deforestación es un factor que promueve la erosión y modificaciones en el balance hídrico, los cuales son factores desencadenantes. Estos modifican tanto en la estructura externa como interna del terreno, de igual forma no se implementan medidas de revegetación para prevenir y evitar el proceso de erosión.

Los factores desencadenantes identificados en la zona se dan principalmente por las características climáticas de la zona, esto favorece los cambios hidrológicos en el terreno, la saturación del suelo y la variación de las presiones intersticiales, por el contenido de humedad en la zona, son factores que promueven cambios en el peso del terreno, la socavación y la erosión, así como la generación de grietas y planos de debilidad, las mismas que generan la inestabilidad y el deslizamiento de los materiales más propensos.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Lynn M. Highland y Peter Bobrowsky (2008). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los*

Otro de los factores desencadenantes por si solos es el peso propio del talud, debido a que este genera mayores presiones internas que generan movimientos cuando se liberan, generados por cambios en la posición de los materiales, agentes como cargas estáticas o dinámicas en los mismos, la ocurrencia de sismos, las fallas presentes en la zona a nivel general, el peso de las escombreras en ubicaciones desfavorables, mega deslizamientos antiguos, son factores que influyen en las presiones internas de estos, generando la falla.

Un 69% de las zonas estudiadas posee un valor alto de masa desplazada, calculado como el volumen desplazado, esto nos indica la magnitud del material que estaba siendo soportado por el talud, relacionándolo como el peso propio del talud que cae por gravedad al generarse movimientos internos de la masa, donde el rango de volumen va desde 50000 a 250000 m<sup>3</sup> clasificado según el Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica, en su mayoría como un deslizamiento mediano.<sup>12</sup> Al generarse una variación de las fuerzas debidas al peso, así como un cambio en el estado tensional se promueve el deslizamiento, en la zona existen fallas de diversas edades que promueven los cambios tanto en la geometría como en la morfología de la zona, la presencia de lagunas y la constante generación de estas indican movimientos topográficos en periodos extensos que conforman de alguna manera mega deslizamientos que abarcan áreas extensas, donde se acumula agua por la formación de ondulaciones debido a los cambios en los ciclos climáticos (seco-húmedo), sedimentación de los materiales, cambios morfológicos, geométricos y agua estancada.

Los cambios en la morfología pueden verse impulsados por procesos de hidrotermalismo generados por diferentes interacciones de los elementos químicos y minerales, con el fluido hidrotermal, la composición de la roca, la temperatura y el pH del agua<sup>13</sup>. Se identificó un

---

*derrumbes*. Servicio Geológico de los EE.UU., Reston, Virginia.

<sup>12</sup> Comité técnico del Código de cimentaciones de Costa Rica. (2016). *Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.

<sup>13</sup> Mariela del Carmen Ocampo Araya. (2016). *Sistema de classificação geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no índice de qualidade hsqi*:

38% de las zonas estudiadas afectadas por procesos hidrotermales, observado por flujos de agua y materiales afectados por el proceso. Ya que es un cambio químico que ocurre durante la interacción del fluido hidrotermal (fluido a altas temperaturas) y el material principalmente en rocas, se presentan cambios químicos y mineralógicos, transformando rocas competentes en suelos arcillosos con gran susceptibilidad al aumento de humedad, afectando las condiciones de la zona al generar cambios morfológicos e hidrológicos que a su vez generan la inestabilidad. Los sitios en los que se determinó los procesos hidrotermales presentan abundantes flujos de agua superficiales y subsuperficiales, que se pudieran observar con las inspecciones a campo.

Parte de los factores desencadenantes de la inestabilidad en la zona es la acción antrópica que alteran el equilibrio en la naturaleza, parte del proceso de construcción es realizar cortes y rellenos para generar las superficies a nivel para la correcta construcción de esta, cuando se realizan los cortes y rellenos, se modifica tanto la geometría, morfología, condición hidrológica y peso del talud. De igual forma la vegetación en la zona es modificada, proporcionando zonas para la fácil erosión y socavación de materiales. Mariela Ocampo (2015) menciona también la generación de vibraciones en el terreno por el uso de explosivos o maquinaria pesada, lo cual contribuye al cambio en las fuerzas internas y el movimiento de algunos materiales generando deslizamientos de materiales en zonas cercanas.<sup>14</sup>

Al combinarse todos los factores condicionantes y desencadenantes antes explicados, se vuelve una zona con alta vulnerabilidad a los deslizamientos y una alta inestabilidad. Según el Cuadro 17, se observa que las características geológicas y geotécnicas negativas de los materiales, la geometría de la excavación y la inexistencia o deficiencia de manejo de agua son características comunes que generan un impacto negativo directo en la vía, con una alta posibilidad de afectación a corto plazo y una mayor necesidad de intervención.

---

<sup>14</sup> Mariela del Carmen Ocampo Araya. (2016). *Sistema de classificação geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no índice de qualidade hsqi: Aplicação na Costa Rica*. Facultad de tecnología Universidade de Brasília.

Las soluciones como: geometría del talud, bermas de alivio, cunetas para el manejo de agua y revegetación han sido implementadas en algunas de las zonas críticas estudiadas. La mayoría de las intervenciones son cambios geométricos de talud provenientes del diseño original para la construcción de la carretera, con sistemas de manejo de agua ineficientes, los cuales fallaron con el paso del tiempo y se encuentran actualmente fuera de funcionamiento, lo que indica o se puede relacionar a una falta de investigación, planeamiento e análisis de las zonas inestables para el diseño de la solución a implementar.

Según el Cuadro 17, para la clasificación de inestabilidad, se puede observar que las zonas críticas: 20+800, 30+700 y 36+130, poseen una alta susceptibilidad al deslizamiento, ya que tienen mayor exposición a factores desencadenantes, en estas áreas están presentes todos los factores desencadenantes: cambios hidrológicos, peso del talud/ladera, erosión, socavación y alteración hidrotermal, cambios morfológicos y de relieve, todos estos fenómenos se encuentran en una etapa desarrollada, es por esto que estas zonas poseen la necesidad de una rápida intervención, ya que actualmente se encuentran con presencia de deslizamientos de gran magnitud. Las zonas 19+800, 20+050, 29+100 y 34+770 son inestables, debido a que poseen todos los factores condicionantes y desencadenantes en una condición moderada. Las zonas 17+400, 18+600, 21+050, 21+640, 31+100, 33+800 con una clasificación moderadamente estable, ya que en estas zonas no se evidencia la presencia de los todos los factores desencadenantes y algunos tienen un bajo nivel de desarrollo. Se corrobora la condición de las zonas como críticas, y el efecto de los factores como determinantes de la condición de los taludes o laderas.

Se realizó un análisis numérico de las zonas de alta inestabilidad, para entender más a fondo el comportamiento de los taludes, y encontrar una manera de estabilizarlos, esto con base en el método de estado límite y en el método de elementos finitos<sup>15</sup>. Al analizar la zona 30+700, se determinan materiales poco competentes en

---

<sup>15</sup> Comité técnico del Código de cimentaciones de Costa Rica. (2016). *Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.

los estratos superficiales como se puede observar en los perfiles geotécnicos elaborados A1-A1', A2-A2' y A3-A3', los materiales deslizados, así como los flujos de lodo, tobas cinerítica o tobas de ceniza poseen una resistencia al corte no drenada muy baja, con valores de entre 0 a 7 KN/m<sup>3</sup> que indica un material muy suelto lo que favorece los deslizamientos, analizando esto por medio del programa Slide de Rocscience se obtienen factores de seguridad en condición estática menores a 1,5 como se observa en el Cuadro 21, lo que no cumple con lo establecido en el código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica, siendo el valor menor un de FS= 0,768 muy por debajo de lo admisible. De igual forma se realizó el análisis en condición pseudo-estática para los tres perfiles elaborados en condición global y local obteniendo un factor de seguridad mínimo de FS=0,548 en una condición local pseudo-estática. Siendo inestable debido a que hay evidencia de deslizamiento y se confirma con el valor del factor de seguridad por debajo de lo aceptable según reglamentación.

Al realizar el análisis numérico podemos corroborar la inestabilidad de las zona crítica, y proponer acciones correctivas para obtener la estabilidad de la zona, para esto se realiza un cambio en la geometría, disminuyendo la pendiente, con un diseño de pendientes 2:1 eliminando los materiales deslizados y gran parte de los materiales con poca cohesión vulnerables a deslizamiento, realizando bermas de 3m de espesor con una contra pendiente que permita conducir el agua escurrida a un sistema de drenaje necesario tanto en el borde del talud como en las bermas externas, para tener un control de las condiciones hidráulicas del talud y prevenir un deslizamiento. Al realizar el análisis numérico de las soluciones planteadas por medio de la metodología de equilibrio limite se obtiene un factor de seguridad mínimo de FS=1,982 en condición estática lo que genera una estabilidad en el talud, y en condición de sismo se determina un FS=1,206 cumpliendo con lo establecido por la normativa nacional.

Al cumplir con la estabilidad de la zona, se procede al análisis numérico mediante elemento finito por medio de deformaciones, en el programa phase2 de Rocscience para esto es necesario introducir valores de módulo de Young y razón de poisson que determinan las características de deformación ante cargas y la dureza de los

materiales así como otros parámetros<sup>16</sup>, las mayores deformaciones se obtienen donde los materiales poseen parámetros más bajos como lo son los flujos de lodo, la toba cinerítica y la toba lapílica, introduciendo estos datos en el programa se obtienen valores de deformación máxima en condiciones naturales, en condición estática y en condición pseudo-estática de 36 metros como se puede observar en el Cuadro 22

Al analizar la solución planteada se obtiene una deformación máxima en centímetros, con un valor menor de 0,20 tanto en condición estática como en condición pseudo-estática. Los análisis correspondientes mencionados se pueden observar en la sección del apéndice 6 y en el Cuadro 24.

Con respecto a la zona 36+130, se construyeron dos perfiles geotécnicos para realizar el análisis de estabilidad, con base en la topografía y estudios realizados. A partir de los estudios y datos recopilados se procede al análisis de estabilidad de la ladera en cuestión, determinando materiales con características desfavorables, baja cohesión y resistencia a la deformación, por lo que no son competentes. Los flujos de lodo, tobas brechosa, poseen parámetros poco favorables principalmente cohesiones muy bajas, con pendientes del terreno levadas, da una vulnerabilidad alta a deslizamiento, realizando en análisis de estado limite, por medio del programa se obtienen factores mínimos de seguridad, se muestran en el Cuadro 29, para los perfiles geotécnicos elaborados B1-B1' y B2-B2', en condición estática se obtiene un factor de FS=0,724 y en condición pseudo-estática un valor de FS= 0,534, lo que no cumple con lo establecido en el código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica.

Ya que se encuentran por debajo de 1,5 en condición estática y 1,1 en condición pseudo-estática. Se modelan dos soluciones para la estabilidad de la zona, la primera es un cambio en la geometría eliminando los depósitos deslizados, y los flujos de lodo que son materiales propensos a deslizarse, con un diseño que incluye bermas de 5 m, reduciendo la pendiente de los taludes. Al analizar la solución se cumple con los factores de seguridad establecido en la normativa nacional,

---

<sup>16</sup> Jaime Suarez. (1995). Comportamiento Sísmico de los Taludes. Capítulo 7, Análisis Geotécnico.

con valores obtenidos de  $FS=1,10$  en la condición más crítica en caso de sismo.

A pesar de que los factores de seguridad brindan estabilidad estos se encuentran al límite de lo permisible<sup>17</sup>, por lo que se recomienda hacer el análisis por deformaciones, obteniendo deformaciones en condición pseudo-estática aceptables, de centímetros. Al poseer un factor de equilibrio límite bajos, pone en riesgo la funcionabilidad del talud y la seguridad de la carretera.

Por esto se planteó una segunda solución disminuyendo las pendientes del talud a una dimensión menor 2:1 de manera que se construyen bermas con un contrapendiente de 0,5%, con un ancho de 5 m y sistemas de manejo de aguas, implementando un suelo cocido incluyendo anclajes pasivos en dos de los taludes superiores, de 18 m de longitud a cada 1,5 m en el talud superior y de 12 m en el inferior y un sistema de manejo de agua y drenaje debido a la condición del nivel freático que se encuentra a una profundidad de 1,35 m de manera muy superficial.

Con lo anterior se realiza el análisis cuantitativo de manera que se obtienen factores de seguridad mayores que los obtenidos con la primera solución, como se muestra en el Cuadro 26, con un valor de  $FS=1,295$  en condición pseudo-estática.

Realizando el análisis con el método de elemento finito se obtienen deformaciones menores a las que se obtuvieron del análisis de la primera solución planteada con un valor máximo de 0,18 m en condición pseudo-estática, y 0,04 m en condición estática, como se muestra en el Cuadro 34.

Realizando una comparación de las zonas estudiadas numéricamente se obtienen factores de seguridad menores a uno para las condiciones naturales, con valores inferiores a  $FS=0,5$  corroborando la alta inestabilidad en los diferentes perfiles de los dos taludes analizados, por el contrario los factores de seguridad dados en los perfiles con soluciones modeladas dan valores mayores a  $FS= 1$  aumentando la estabilidad de la zona, en cuanto al análisis de equilibrio límite.

Con base en el estudio de las 13 zonas, se plantean soluciones puntuales para los

problemas específicos, por las problemáticas determinadas.

Al realizar un cambio en la geometría con movimientos de tierra al excavar y disminuir el material en la parte superior (corona) de los taludes las fuerzas impulsoras de inestabilidad disminuyen, aumentando el peso en la parte inferior del pie que permite darle mayor soporte al talud.

El cambio de la geometría es una de las técnicas más eficientes en estabilidad, de un bajo costo en comparación con otros métodos, si se sigue un proceso constructivo correcto y se brinda mantenimiento y monitoreo. Al implementar soluciones para erradicar este tipo de problemas se disminuyen las condiciones necesarias para inestabilidad, que es una prioridad en la estabilización.

Para disminuir el efecto de los factores desencadenantes en la zona es fundamental la implementación de sistemas de manejo de agua y drenajes, con un diseño que permita evacuar todas las aguas del talud y que no se acumule agua, aumentando las condiciones de humedad, saturando el suelo y generando mayor presión y fuerzas internas en el terreno, debido al aumento del peso por la condición de humedad.

Aparte de ser una zona con un clima húmedo, los sistemas de manejo de agua son zanjas y cunetas para el manejo de aguas superficiales, drenajes para el control de flujos de agua y niveles freáticos superficiales. El manejo de agua también minimiza los procesos de meteorización, erosión e hidro-termalismo. La solución implementada debe ir siempre acompañada de un sistema hidráulico para el manejo de aguas diseñado específicamente para solventar las necesidades de la estructura o acción que permite estabilizar el talud.

Uno de los aspectos importantes es la revegetación la cual disminuye los fenómenos de erosión, ya que permite la unificación de los materiales con los diferentes tipos de vegetación, controlando de igual forma el contenido de agua. Otro sistema para la protección de los suelos, de las precipitaciones y los factores mencionados son los revestimientos del suelo, ya sea con sistemas geo-textiles de polímeros o concreto hidráulico reforzado, evitando de esta manera los cambios de relieve y morfológicos y minimizando los cambios hidrológicos.

Los sistemas de refuerzo como los diferentes tipos de muros, pilotes, pilas y anclajes

---

<sup>17</sup> Pedro Ramírez Oyanguren y Leandro Alejandro Monge. (2004). *Mecánica de Rocas, Fundamentos e Ingeniería de taludes*. Universidad Politécnica de Madrid

se recomiendan en zonas con alta inestabilidad, cuando las soluciones planteadas anteriormente no estabilizan el talud/ladera o superan los costos, debido a que por ser estructuras deben ser diseñadas para su capacidad soportante y conllevan un proceso constructivo con diferentes materiales, y equipo poco común en algunos casos, así como un costo elevado. Estas estructuras funcionan cuando existe una litología del terreno con características desfavorables, con materiales altamente plásticos y de baja cohesión u ángulo de fricción, taludes con alturas elevadas donde es necesario aumentar el peso y soporte en el pie de este. Cuando las presiones internas son elevadas se recomienda diseño y construcción de estructuras de soporte.

Para medir estos diferentes parámetros como lo son: las deformaciones tanto internas como superficiales, la presión de poro, y la presión de empuje se debe realizar un control de monitoreo, lo que a su vez funciona para conocer con precisión las causas de la inestabilidad y el comportamiento de los taludes, para implementar acciones correctivas adecuadas, y poder realizar una intervención en caso de estado de alerta. Ya que la zona ha presentado deslizamientos, excesivos cortes y rellenos, por lo que es necesario medir una tasa de deslizamiento, así como la efectividad de las medidas implementadas para asegurar estabilidad algunos sectores.

Para esto se clasificaron las zonas según el código geotécnico de taludes y laderas de costa rica con una relación entre el nivel de riesgo y la complejidad geotécnica del talud/ladera. Donde el 62% posee un nivel de riesgo una complejidad geotécnica alta, y un 38% media, esto para un 77% de taludes con la necesidad de instrumentación tipo C, obligatoria e indispensable, y un 23% de tipo B, recomendable la instalación de instrumentación que aporte información relevante que permita garantizar y verificar la estabilidad o inestabilidad de los taludes o laderas.

Se plantean sistemas de desplazamientos superficiales, movimientos verticales y horizontales, a través de un control topográfico de precisión, a partir de bases localizadas fuera del área con presencia de inestabilidad, generando una malla de testigos superficiales dentro de la zona que se desea monitorear.

Para el control de deslizamientos a profundidad, localización de fallas se recomienda

el TDR Reflectómetro de Dominio Tiempo<sup>18</sup>, para determinar los planos de ruptura y los movimientos internos que se generan, de igual forma inclinómetros verticales que permitan determinar los grados de inclinación de la pendiente en los taludes.

Otro de los aspectos a medir en la zona de gran importancia es la presión de poro, para lo cual se propuso la implementación de piezómetros en especial de cuerda vibrante, se sugirió la ubicación de cada uno de los instrumentos para cada estación según los parámetros físicos, la finalidad de medición y las limitantes en campo.

De igual forma se coloca en todos los casos más de una instrumentación de cada tipo para poder realizar una comparación y análisis correcto de los datos, de manera que la información recolectada sea verdaderamente valiosa y se puedan detectar anomalías.

Es de suma importancia considerar la pérdida de los equipos, debido a la inestabilidad que estos representan y pueden presenciar, lo que a su vez representan costos económicos. La alteración de los instrumentos por parte de trabajos de obra en campo puede alterar los datos y la información transmitida, por lo tanto, se debe contar con un número significativo de instrumentos y de profesionales encargados de leer y analizar los datos reportados.

---

<sup>18</sup> Carlos Roberto Sáenz González. (2017). *Propuesta de instrumentación de sitio presa del Proyecto Hidroeléctrico: El Diquís*. Instituto Tecnológico de Costa Rica: Escuela de Ingeniería en Construcción

# Conclusiones

A continuación se enlistan las conclusiones resultado del desarrollo de este estudio:

- 1) Se identificaron 49 zonas vulnerables en la totalidad del corredor vial en el tramo Sifón-La Abundancia, de las cuales 25 zonas con presencia de deslizamiento, 12 zonas intervenidas, 8 zonas intervenidas con presencia de deslizamiento y 4 zonas vulnerables a deslizamientos de gran magnitud. Las zonas deslizadas se presentan en la totalidad del tramo Sifón-La Abundancia y debido a esto se han generado cambios en el alineamiento del diseño original de la carretera debido a los fenómenos de inestabilidad.
- 2) El relieve y la topografía de la zona son irregulares, con una fila de montañas con fuertes pendientes desde una perspectiva global. El tramo de la carretera cuenta con 18 cortes de drenajes cercanos a las zonas vulnerables, que promueven la inestabilidad en estas áreas, las quebradas cercanas al área de construcción de la carretera, como la quebrada Yeguas y Laguna son las que presentan mayores problemas de inestabilidad en las zonas laterales de las cuencas.
- 3) La carretera presenta diferentes tipos de afectación, desde daños en las cunetas como una afectación leve hasta grietas, destrucción de la vía y afectación en propiedades vecinas o vías secundarias, debido a los deslizamientos en los taludes presentes en el corredor vial. Un 65% de las zonas estudiadas cuenta con daños generados en las cunetas, 57% presenta material en la vía, 33% caída de bloques en la carretera, 20% obstrucción de la vía debido a la magnitud del deslizamiento presentado, 10% grietas generadas en la vía, 2% de la totalidad de las zonas se encuentra completamente en destrucción y 4% de las 13 zonas estudiadas tiene daños en vía secundaria y propiedad privada.
- 4) El tramo Sifón-La Abundancia se ve afectado por factores tanto condicionantes: geometría (pendiente y altura elevada), litología (características desfavorables de materiales), meteorización y deforestación. Como desencadenantes: cambios morfológicos y de condiciones hidrológicas, peso propio, socavación, erosión y alteración hidrotermal. Estos factores son causantes de los fenómenos de deslizamiento, el 85% de las 13 zonas estudiadas presentan problemas de geometría ya sea por la altura o el grado de inclinación, relacionado con los cortes generados en carretera con un grado de inclinación elevado.
- 5) Un 69% presenta una litología con características poco competentes, la meteorización y erosión son factores predominantes produciendo suelos sueltos, de baja cohesión y baja resistencia. Un 85% posee problemas de saturación, algunas con flujos de agua superficiales relacionados con un inexistente o mal manejo de sistemas de conducción de aguas, lo que favorece la socavación que se da en un 69% de las zonas estudiadas.
- 6) Se determinó que en la mayor parte de los sitios estudiados predominan los materiales de origen volcánico como lo son brechas, tobas, lavas materiales de origen volcánico y flujos de lodo, con características desfavorables, en la totalidad de las zonas se encuentran

depósitos deslizados con una granulometría limo arenosa, poseen una baja cohesión y la mayoría de los materiales se encuentra altamente meteorizados lo que favorece en gran medida la inestabilidad. La mayoría de los materiales poseen una alta plasticidad por lo que en condiciones desfavorables permiten deformaciones de gran magnitud.

- 7) La meteorización y erosión son los factores con mayor predominancia en la zona, lo que indica que es de suma importancia tomar en cuenta estos factores para el análisis de la estabilidad de los taludes o laderas, de tal manera que se realice un análisis probabilístico de manera complementaria al análisis determinístico, ya que este toma en cuenta las propiedades del material que se ve afectado por dichos procesos.
- 8) Según la matriz de inestabilidad, las zonas críticas presentan una alta inestabilidad debido a que poseen todos los factores condicionantes (geometría, litología, meteorización, deforestación) y desencadenantes (cambios morfológicos, hidrológicos, socavación, erosión) en una condición moderada o alta. Mientras que las zonas con una clasificación moderadamente estable no poseen evidencia de todos los factores desencadenantes o tienen un nivel bajo de desarrollo.
- 9) El análisis de estabilidad por medio de equilibrio límite da como resultado una alta inestabilidad por los FS menores que 1,5 y 1,1 en condición estática y pseudo-estática respectivamente, para ambas zonas críticas estudiadas. Realizando el análisis con el planteamiento de las soluciones la estabilidad aumenta hasta cumplir con lo establecido por el código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica, por lo que es fundamental en análisis geotécnico de taludes para la propuesta y diseño de soluciones a implementar, antes de iniciar con la ejecución.
- 10) El análisis de estabilidad por medio de elementos finito brinda resultados con altas deformaciones para el estado natural de los

perfiles analizados en las dos zonas críticas, con deformaciones de metros. Al realizar el análisis con la implementación de soluciones las deformaciones y esfuerzos disminuyen considerablemente por lo que es fundamental el análisis por el método de elementos finitos cuando se presenta un factor de seguridad muy bajo por medio del análisis de equilibrio límite.

- 11) Se debe realizar un estudio previo, de los factores condicionantes y desencadenantes a la hora de realizar una propuesta de estabilidad de taludes o laderas, de manera que se puedan considerar factores externos que no se contemplan en los análisis determinísticos y que tienen gran relevancia en el comportamiento del mismo.
- 12) Existe una escasa implementación e intervención en la zona, por medio de acciones correctivas que generen estabilidad en las zonas críticas. El cambio de geometría en los taludes, con pendientes de 2:1 es una de las soluciones con mayor efectividad y de un bajo costo, que permite estabilizar un talud o ladera junto con bancos o bermas de alivio que brinden un diseño completo de mejora.
- 13) Los sistemas de manejo de agua son fundamentales para un adecuado funcionamiento de las acciones correctivas propuestas en todas las zonas analizadas. Al poseer una condición húmeda o saturada y por las condiciones climáticas de la zona, es una obligación el diseño de sistemas de evacuación de aguas en las laderas y taludes, así como a lo largo de la carretera, para que dichas estructuras mantengan su funcionalidad.
- 14) Los sistemas de instrumentación son obligatorios en el 77% de las 13 zonas estudiadas, para el monitoreo y la verificación de inestabilidad, así como de la condición de esta. Un 23% de las zonas críticas de la zona, poseen recomendación de instrumentación de monitoreo según el código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica.

# Recomendaciones

- 1) Antes de realizar una obra para la estabilidad de taludes o laderas, se recomienda realizar un estudio previo de los factores condicionantes tanto como desencadenantes presentes en el sitio, así como un análisis de estabilidad o inestabilidad geotécnico que permita medir cuantitativamente el grado de inestabilidad y el riesgo que se tiene al realizar cualquier tipo de obra, esto de manera casi obligatoria.
- 2) Evitar las zonas con presencia de deslizamientos antiguos, relieves montañosos de altas pendientes, humedales y fallas geológica en el diseño del alineamiento de las carreteras del país.
- 3) Se recomienda realizar una investigación de las condiciones, relieve, morfología, entre otros aspectos de la zona, para conocer el comportamiento alrededor y las posibles causas de las zonas con presencia de inestabilidad antes del diseño de la carretera.
- 4) Se recomienda que la matriz planteada sea sometida a un proceso de validación para ser utilizada en otros proyectos similares, y de esta manera poner en práctica y poder clasificar la inestabilidad de una zona con diversas condiciones.
- 5) Se recomienda realizar un análisis tanto probabilístico como determinístico, ya que el primer análisis toma en cuenta factores externos que el segundo análisis en su memoria de cálculo no contempla. Por criterio experto e ingenieril se conoce que hay factores externos a los evaluados en sistemas o metodologías numéricas que afectan de gran forma en la inestabilidad o comportamiento de un talud o ladera.
- 6) Realizar estudios de geofísica completos que permitan conocer con certeza la composición de los estratos presentes en la zona, así como el grado de meteorización, erosión o algún otro proceso que afecta esto, esto es vital para un buen análisis y un correcto planteamiento de acciones correctivas.
- 7) Instalar sistemas de monitoreo que permitan medir movimientos superficiales como internos en las zonas vulnerables, con el fin de minimizar o evitar daños en la vía, esto en diferentes etapas de la obra de infraestructura.
- 8) Se recomienda la instalación de estaciones meteorológicas en proyectos de infraestructura vial, con condiciones desfavorables que permitan estudiar los periodos de lluvias y la intensidad, que son factores desencadenantes de deslizamientos.
- 9) En cuanto a acciones correctivas es importante implementar sistemas que controlen los factores condicionantes para evitar que las zonas cuenten con condiciones que promueven algunos de los factores desencadenantes, los cuales provocan deslizamientos en periodos cortos.
- 10) Se recomienda colocar sistemas de evacuación de aguas pluviales, sistemas de drenajes y demás que permitan controlar la humedad, el alto contenido de humedad, a lo largo del corredor vial y principalmente en las zonas con alta vulnerabilidad.
- 11) Se recomienda considerar la capacidad del sistema de drenaje para la evacuación de agua, según la intensidad de lluvia y las características específicas de humedad en cada una de las zonas.

# Apéndices

Apéndice 1: Identificación de zonas vulnerables

Apéndice 2: Ubicación de zonas identificadas

Apéndice 3: Características generales y problemáticas de las zonas identificadas.

Apéndice 4. Caracterización y Clasificación general de zonas críticas (13 zonas estudiadas).





Apéndice 5. Caracterización geológica y geotécnica de materiales de zonas críticas.

Apéndice 6. Análisis Geotécnico de zonas críticas.





Apéndice 7: Memoria de cálculo para anclajes pasivos.





## Apéndice 1: Identificación de zonas vulnerables





Cuadro 19 Identificación de zonas vulnerables en tramo Sifón-La Abundancia, Ruta 35. I Semestre 2018.





Zona	Clasificación	Descripción	Imagen
1	Deslizamiento	Es una zona vulnerable, con pequeños deslizamientos de masa, de manera general los suelos observados son clasificados como suelos finos. Tiene una vegetación baja compuesta de arbustos principalmente, se encuentra en condición húmeda, no cuenta con manejo de aguas.	
2	Deslizamiento	Es considerada una zona vulnerable, posee deslizamiento de materiales finos tiene poca vegetación, casi nula. Se encuentra en una condición húmeda, no posee sistemas de manejo de aguas.	
3	Intervenida	Es una zona intervenida, en la cual se realizo un sistema de drenaje compuesto por una cama de bloques que funcionan como drenajes, o también llamado muro de escollera. Esto para evitar el deslizamiento de materiales y la afectación de la vía, por lo que se puede observar un buen resultado y funcionalidad de la obra.	
4	Deslizamiento	Esta zona es una zona de deslizamiento, la cual ha sido estudiada y analizada ya que era una zona vulnerable, lo que se puede verificar con la imagen ya que se dio un deslizamiento de gran magnitud que afecto el paso en la vía. Esta zona es muy húmeda, los suelos están saturados, se da presencia de suelos finos, no hay drenaje ni un manejo de aguas, por lo que se considera una zona inestable, por la magnitud, la pendiente de la zona y las condiciones antes mencionadas.	

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.





5	Vulnerable	<p>Es una zona vulnerable, con una cantidad media de vegetación principalmente arbustos, se puede ver una condición húmeda con flujos de agua, y sin ningún tipo de manejo de agua por lo que es una zona propensa a un deslizamiento, por las condiciones antes mencionadas, donde se ha generado solamente el corte geométrico de diseño.</p>	
6	Intervenida/Deslizamiento	<p>Se da un deslizamiento de suelos finos, principalmente se observan suelos finos, tobas blancas y brechas finas. Con una condición de humedad alta, no existe un sistema de manejo de aguas. Se puede observar un proceso de erosión diferencial, debido al deslizamiento de la masa en el terreno se enterró un muro de gaviones que se había construido como intervención para evitar afectaciones en la vía. Como se puede observar es posible</p>	
7	Vulnerable	<p>Es una zona vulnerable con poca vegetación, de arbustos, en condición húmeda, se observa suelos rojizos, principalmente arcillosos con un depósito en forma de V. Se dan problemas de erosión y no existe un manejo de agua, por lo que zona es vulnerable a deslizamientos.</p>	
8	Deslizamiento	<p>Se presenta un deslizamiento y zona vulnerable a una mayor afectación esto porque se presenta una zona saturada, donde la mayoría de materiales observados son finos, existe poca vegetación, como arbustos, este deslizamiento afecta una vía secundaria que pasa sobre este deslizamiento, lo que podría tener una afectación mayor en la carretera a futuro.</p>	





9	Deslizamiento	<p>Se presenta un deslizamiento, en una zona saturada como se puede observar con presencia de materiales arenosos y finos, como brechas y tobas. Se da una condición de vegetación media, no existe manejo de aguas, por este motivo y la geología del sitio es posible una afectación en la vía a futuro, ya que el material continua desplazándose. Se han realizado estudios previos y existe una solución planteada pero no ha sido ejecutada.</p>	
10	Deslizamiento	<p>Se puede observar un deslizamiento, con una cantidad de masa de suelo considerable, donde se observan suelos finos, y un poco cantidad de bloques pequeños de roca, existe una cantidad media de vegetación con pasto y arbustos. Se encuentra en una condición saturada de agua, con un sistema temporal de manejo de aguas. Hay una gran cantidad de zonas alteradas por el deslizamiento, por lo que es posible que haya una afectación de la vía, en esta zona no se ha realizado ninguna acción como solución del problema, solamente se encuentra la geometría de diseño para el talud, que se vio afectada por el deslizamiento</p>	
11	Intervenida	<p>Se puede observar, la construcción de un muro de gaviones, de igual forma la erosión que se da en el terreno, ya que los materiales se están desplazados y presentan un cambio de color lo que deja evidencia de este fenómeno, Este terreno se encuentra en una condición Saturada.</p>	
12	Deslizamiento	<p>En este mismo punto, pero al lado opuesto se presenta un deslizamiento, que presenta una condición del suelo saturada, con una escases de vegetación notoria, de igual forma no hay sistemas de drenaje lo que provoca la erosión del suelo y el deslizamiento del material, según la figura 12 existe gran cantidad de suelos finos, con algunos pequeñas rocas.</p>	





13	Deslizamiento	<p>Se da un deslizamiento, de materiales principalmente finos como limos rojizos, blancos y grises, en una condición saturada, por lo que se da una erosión del suelo. Si existe un manejo de aguas no funcional, por lo que el deslizamiento puede afectar la vía secundaria, ya que solo se ha realizado el diseño geométrico para la construcción de la carretera.</p>	
14	Intervenida/Deslizamiento	<p>Es una zona intervenida, vulnerable, la cual cuenta con un sistema de manejo de aguas y una revegetación, de igual forma la presencia de suelos finos y la saturación del terreno podrían hacer que la zona sufra un deslizamiento, por lo que es considerable tomar en cuenta realizar otra solución, ya que se observan pequeños deslizamientos de material y podrían afectar la vía secundaria en un futuro.</p>	
15	Intervenida	<p>Existe una zona vulnerable sobre la segunda berma, se observa una erosión del suelo a los costados de la construcción del muro de gaviones, por lo que la zona se vuelve vulnerable ya que el muro de gaviones es flexible y tiene a deformarse.</p>	
16	Intervenida	<p>La zona que se muestra a continuación es una zona que muestra un deslizamiento pequeño debido a la erosión, a la presencia de suelos finos, poca vegetación como arbustos, de igual forma se puede observar el muro de gaviones a un extremo del material deslizado, aunque cuenta con cunetas que ayudan al drenaje del agua, se da un desprendimiento del material cortado, para dar la geometría de diseño al terreno. Esta zona es vulnerable a deslizamiento, de igual forma por el peso superior y posibles condiciones de humedad que varien con el paso del tiempo.</p>	





17	Deslizamiento	<p>Es una zona donde hay presencia de deslizamiento, previamente estudiada y una de las que posee mayor altura y pendiente debido a la geometría de diseño de la carretera, no existe una vegetación constante, por lo que es muy leve pasto, se encuentran rocas intercaladas, suelos y suelos quemados, así como la presencia de bloques caídos, la condición de drenaje es de suelos saturados y rocas drenadas</p>	
18	Deslizamiento	<p>Hay una leve cantidad de vegetación, es una zona de deslizamiento con grandes cantidades de masa desplazada, se observan suelos saturados y finos, también pequeños bloques de roca, una cantidad abundante de grutas, junto con un proceso de erosión notorio, en esta zona no existe ninguna obra para la solución del problema, solamente la geometría de diseño que se realizó previamente y que se ha deteriorado.</p>	
19	Vulnerable	<p>La geología de esta zona no favorece la construcción de la carretera, ya que hay presencia de suelos muy blandos, tobas blancas, lavas fracturadas y suelos quemados, además de la saturación del suelo, con presencia de flujos de agua, existe en esta zona sistema de manejo de aguas, como drenajes. No hay vegetación presente de manera general. Es necesario la intervención para el control y la prevención de deslizamiento, en esta zona se propone la creación de un túnel vial, ya que esta y zonas cercanas tienen problemas por fallas presentes, lagunas o humedales presentes y condiciones de desventaja.</p>	
20	Deslizamiento	<p>Zona con una leve vegetación, con arbustos, húmeda, con suelos finos y arcillosos, tobas blancas y cafés, no cuenta con sistemas de manejo de aguas, se observan procesos de erosión, saturación. No hay intervención o soluciones planteadas para esta zona.</p>	

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.





21	Deslizamiento	<p>Se presentan deslizamientos, específicamente de traslación, que afectan la vía, los suelos son blandos y saturados, no existe un manejo de aguas, por lo que la geología de la zona más la condición de humedad, permiten y promueven el movimiento de la masa.</p>	
22	Intervenida/ Deslizamiento	<p>Se da un deslizamiento de suelos finos, que afecta la vía baja, con una condición saturados, si existe una vegetación media en la zona de arbustos y pasto, existe un sistema de drenaje tipo muro de escollera el cual se vio afectado por el deslizamiento del terreno en la parte superior de la corona.</p>	
23	Deslizamiento	<p>Se puede observar el deslizamiento del terreno, con presencia de suelos finos, como limos, se da una saturación del suelo y proceso de erosión que promueve el movimiento de la masa, no existe presencia de una vegetación densa. No hay intervención para solución de la zona</p>	
24	Intervenida/ Deslizamiento	<p>Se observa la intervención de la zona con un muro de gaviones, y de igual forma un deslizamiento al costado de este, con una presencia de suelos muy finos como limos o arcillas, en una condición saturada, no hay un manejo de aguas aunque la zona si este intervenida, este deslizamiento afecta la vía a baja escala.</p>	





25	Intervenida	<p>La zona es intervenida con un muro de gaviones y revegetación que permite darle estabilidad al terreno, y con cunetas que permiten tener un mejor control de las aguas, aún así se puede observar como existe una vulnerabilidad de deslizamiento en los bordes del muro por la erosión que se da en el terreno.</p>	
26	Intervenida	<p>El muro de gaviones se construye para la intervención de la zona y brindar estabilidad al terreno, se puede observar la presencia de suelos finos saturados en los bordes, por lo que esto al igual que la imagen anterior podría presentar vulnerabilidad de deslizamientos a los costados, con poca afectación en la vía.</p>	
27	Deslizamiento	<p>Deslizamiento de suelos finos y blandos, con presencia de fracturación del suelo, una condición de saturación aún con la presencia de cunetas o manejo de aguas, por lo que el sistema es ineficiente ya que no cumple su funcionalidad. Se da una afectación de la vía baja.</p>	
28	Intervenida	<p>Es una de las zonas intervenidas por medio de cortes por la geometría de diseño del talud, con una vegetación media de pasto y arbustos, los suelos presentes son suelos finos en una condición húmeda de la zona, no hay presencia de deslizamientos y posee una baja o nula posibilidad de afectación de la vía.</p>	





28	Intervenida	Es una de las zonas intervenidas por medio de cortes por la geometría de diseño del talud, con una vegetación media de pasto y arbustos, los suelos presentes son suelos finos en una condición húmeda de la zona, no hay presencia de deslizamientos y posee una baja o nula posibilidad de afectación de la vía.	
29	Intervenida	Se puede observar una zona de suelos finos, con una condición saturada, con flujos de agua, un manejo inexistente de aguas, existe una geometría de diseño del talud, el cual es la única intervención realizada hasta el momento y tiene una vulnerabilidad de deslizamiento.	
30	Intervenida	La zona es intervenida por medio de un muro de gaviones, se da una revegetación del corte para la geometría de diseño del talud, donde existe presencia media de pasto y arbustos, en una condición húmeda. Es importante considerar que se encuentra en una zona montañosa y que posee una alta pendiente.	
31	Deslizamiento	Se observan suelos blandos sobre roca, leve vegetación de pasto, un deslizamiento del suelo, con una afectación de la vía mínima, presenta una condición húmeda, la única intervención ha sido el diseño geométrico del talud, el cual se deslizó.	

32	Deslizamiento	<p>Esta es una zona con una gran cantidad de suelos finos y una condición saturada con presencia de flujos de agua, donde se presenta un movimiento de la masa de suelo el cual afecta a la carretera por medio de grietas en esta y que podría verse afectada de mayo forma a futuro, ya que el material puede seguir desplazándose por las condiciones en las que se encuentra.</p>	
33	Vulnerable	<p>Las escombreras a continuación presentan una saturación del terreno debido a un mal drenaje y a un manejo de aguas inexistente, por lo tanto la saturación de estas y el peso extra que esta le brinda, puede generar un movimiento de tierra que afectaría a la vía, por lo que es una zona vulnerable, de igual forma el suelo presente en la zona en su gran mayoría esta conformado por suelos finos por lo tanto bajo estas condiciones la posibilidad es más alta.</p>	
34	Deslizamiento	<p>Se da un movimiento de la masa, de una cantidad significativa de material principalmente suelos finos con bloques pequeños de roca, esto principalmente por la erosión que se muestra, la saturación y la inexistencia de un manejo de aguas. Por lo que es una zona vulnerable a un deslizamiento mayor y a la afectación de la vía.</p>	
35	Deslizamiento	<p>Deslizamiento de gran magnitud, con presencia de suelos finos (limos y arcillas) principalmente observados en la corona del deslizamiento, una condición húmeda saturada, con presencia de flujos de agua, que forman lagunas por la acumulación del agua en la parte baja del deslizamiento, un manejo de aguas inexistente, no hay drenajes, el relieve montañoso con una alta pendiente, el peso por gravedad son factores posibles del deslizamiento. Este es uno de los últimos deslizamiento de gran magnitud presentados en la zona, el cual afecto en gran magnitud la zona por la que pasa la carretera.</p>	

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

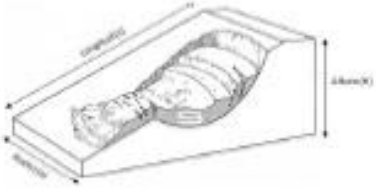
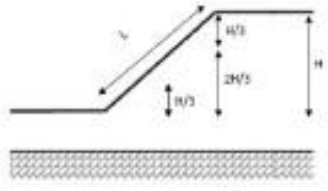
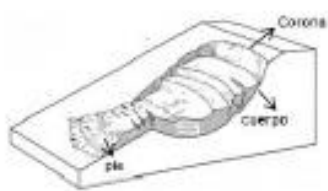
36	Deslizamiento	<p>La geología de la zona presenta suelos finos y bloques de roca, que se han desplazado y generado deslizamientos, de igual forma la condición saturada ha hecho que se formen lagunas, también se evidencia la presencia de una grieta de gran tamaño que atraviesa el terreno y la zona por donde pasa la vía, por lo que esta zona es una zona con presencia de deslizamiento y vulnerable a futuros problemas, no posee ningún tipo de intervención adicional más que el diseño geométrico por diseño de la carretera.</p>	
37	Deslizamiento	<p>La geología de la zona presenta suelos finos y bloques de roca, que se han desplazado y generado deslizamientos, de igual forma la condición saturada ha hecho que se formen lagunas, también se evidencia la presencia de una grieta de gran tamaño que atraviesa el terreno y la zona por donde pasa la vía, por lo que esta zona es una zona con presencia de deslizamiento y vulnerable a futuros problemas, no posee ningún tipo de intervención adicional más que el diseño geométrico por diseño de la carretera. Esta zona con la anterior están juntas y han sido estudiadas previamente por la problemática que presentan.</p>	
38	Deslizamiento	<p>No cuenta con ninguna intervención, más que el diseño geométrico, se dan problemas de erosión en la parte superior y un deslizamiento en el pie debido a la saturación del suelo. No existe manejo de aguas o drenajes en la zona lo que la hace más vulnerable a este tipo de fenómeno.</p>	
39	Deslizamiento	<p>Es una de las zonas estudiadas previamente, por la problemática que presenta, se da la presencia de suelos finos en una condición húmeda lo que promueve el deslizamiento del material, no posee con un sistema de manejo de aguas.</p>	

40	Intervenida	<p>Zona intervenida por medio de anclajes, drenajes y revestimiento, para la estabilidad de la zona, se puede observar una vegetación media de pasto y arbustos que permiten una mejor estabilidad de la zona. Se observa el corte del diseño geométrico de talud con una pendiente alta, aun así el terreno se ve observa en buenas condiciones, y la solución ah funcionado de buena manera.</p>	
41	Deslizamiento	<p>Deslizamiento de poca magnitud con una posible afectación en la vía, se observa suelos muy finos, y en condición húmeda, se observa proceso de erosión. No haya un sistema de conducción de agua.</p>	
42	Deslizamiento	<p>Es uno de los sitios previamente estudiados, por los movimientos de masa que presenta, y por la posibilidad o vulnerabilidad de un deslizamiento de mayor magnitud, esta zona posee una vegetación media con pasto y arbustos, en una condición húmeda, la mayoría de suelos observados son finos y la condición del terreno es húmeda.</p>	
43	Intervenida/ Deslizamiento	<p>Esta zona fue intervenida, para dar estabilidad y sostenimiento al macizo rocoso que se observa en la figura 43, se presentan caídas de bloques de tamaños medianos, y también del revestimiento utilizado para la obra de retención con anclajes, esta no funciona y es necesaria otra solución, este deslizamiento se encuentra en la carretera secundaria que pasa por la construcción de las bases de uno de los puentes de la carretera principal. Se observa una condición saturada y no hay presencia de vegetación.</p>	

44	Deslizamiento	<p>Es una de las zonas con mayor problemática, por la condición de saturación del suelo, presencia de flujos de agua en gran magnitud, se presentan cortes del terreno para la geometría del diseño que ya ha sido afectada, deslizamiento pequeños que ya afectan el ancho de la vía, esta zona esta en construcción por lo que no se conoce la intervención a realizar hasta el momento, pero cabe resaltar que es un tramo considerable en el que se presentan varias problemáticas, de igual forma un suelo en su mayoría fino.</p>	
45	Intervenida/ Deslizamiento	<p>Esta zona presenta la geometría de diseño de talud, también revegetación y sistema de manejo de aguas como se observa en la figura 45, aún así se da un deslizamiento del material esto por la geología de la zona, la cual se observa que son materiales finos, y por un posible proceso de erosión</p>	
46	Intervenida	<p>Zona intervenida como muro de gaviones para la estabilidad del terreno, de igual forma revegetación en los costados para la prevención de deslizamientos en estos suelos, se encuentra en una condición húmeda y no cuenta con sistemas de drenajes o manejo de aguas.</p>	
47	Intervenida	<p>Zona intervenida en la que se realizó el corte geométrico de diseño para la carretera, más sistema de revegetación, la zona se encuentra estable y no posee riesgo de deslizamiento o de afectación de la vía.</p>	

48	Intervenida/ Deslizamiento	Material presente es principalmente fino, no existe una vegetación abundante, sino más bien escasa. Se dan posibles problemas de erosión, y condiciones de saturación del suelo, que provocan e deslizamiento o movimiento de la masa, de igual forma por una alta pendiente del corte de diseño.	
49	Intervenida/ Deslizamiento	Material presente es principalmente fino, no existe una vegetación abundante, sino más bien escasa. Se dan posibles problemas de erosión, y condiciones de saturación del suelo, que provocan e deslizamiento o movimiento de la masa	

Hoja utilizada para la inspección de taludes en campo.

INSPECCIÓN DE TALUDES EN CARRETERAS									
Fecha					Ing responsable				
Proyecto					Cedula				
Cliente					No. Registro				
Ubicación									
Zona	Margen	Punto GPS	Provincia	Cantón	Distrito	Coord Este	Coord Norte	Elevación (m)	Riesgo
<b>Categoría del Talud</b>					<b>Tipo de Talud</b>				
A	Zona con deslizamiento					I	Ladera natural		
B	Zona intervenida					II	Talud Corte		
C	Zona intervenida con deslizamiento					III	Talud Relleno		
D	Zona vulnerable a deslizamiento								
E	Zona estable								
Longitud (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Pendiente %	Corona (msnm)	Cabeza (msnm)	Pie (msnm)	Punta (msnm)	Profundidad (m)	Volumen (m³)
									
Vegetación	Condición de vegetación	Condición Drenaje	Manejo de Aguas	Sistema de aguas					
Pasto	Alta	Seca	Nulo	Natural					
Arbustos	Media	humeda	Existente	Artificial					
Arboles	Baja	Saturada	Eficiente	Otro					
Ninguna	Nula	Agua libre	Deficiente						
Tipo de Relieve	Uso de suelos	Perfil de ladera	Materiales presentes	Materiales deslizados					
Suave	Terreno natural	Uniforme	Arcillas y limos	Arcillas/limos					
Ondulado	carretera	Cóncavo	Arenas y finos	Arenas/finos					
Escarpado	urbanización	Convexo	Granulares	Granulares					
Montañoso	Otro	Combinado	Grava/Roca	Grava/Roca					
Problemas	Mecanismo Condicionante	Mecanismo Impulsor	Tipo de deslizamiento	Superficie deslizamiento					
Geometría	Pendiente	Hidrogeológica	Traslacional	Suelo-Suelo					
Litología	Geometría	Peso por gravedad	Rotacional	Roca-Roca					
Saturación	Litología	Socavación	Compuesto	Suelo-Roca					
Erosión	Meteorización	A.Hidrotermal	Hundimiento						
Otro	Deforestación	Erosión	Otro						
Afectación de Vía			Soluciones realizadas						
No hay daños	Grietas en vía		Geometría de talud	Estructuras ancladas					
daño en cunetas	Deslizamiento vía		Bermas de Alivio	Estructuras enterradas					
material en vía	Destrucción vía		Drenajes internos	Muros de contención					
calda bloques	Daño vía secund		Drenajes superficiales	Revegetación					
Obstrucción vía	Daño prop vecina		Protección Suelo	Otra					

## Apéndice 2: Ubicación de zonas identificadas

Cuadro 20 Localización de zonas vulnerables identificadas en la ruta 35 Sifón-La Abundancia.

LOCALIZACIÓN DE ZONAS VULNERABLES EN RUTA SIFÓN-LA ABUNDANCIA						
Zona	Margen	Punto	Coordenada E	Coordenada N	Elevación (m)	Zona
1	Derecho	1799	487469	256822	616	Deslizamiento
2	Izquierdo	1799	487469	256822	616	Deslizamiento
3	Derecho	1800	487351	255971	630	Intervenida
4	Derecho	1801	486752	255569	630	Deslizamiento
5	Derecho	1802	486083	254598	641	Vulnerable
6	Derecho	1803	486071	254491	645	Intervenida/Deslizamiento
7	Derecho	1804	486044	254088	668	Vulnerable
8	Derecho	1805	485979	253852	683	Deslizamiento
9	Derecho	1806	486047	253513	704	Deslizamiento
10	Derecho	1807	486277	253286	716	Deslizamiento
11	Derecho	1808	486543	252968	720	Intervenida
12	Izquierdo	1808	486543	252968	720	Deslizamiento
13	Derecho	1809	486577	252715	725	Deslizamiento
14	Derecho	1809	486577	252715	725	Intervenida/Deslizamiento
15	Derecho	1810	486523	252432	727	Intervenida
16	Izquierdo	1810	486523	252432	727	Intervenida
17	Derecho	1811	486124	251435	729	Deslizamiento
18	Derecho	1812	486124	251435	729	Deslizamiento
19	Derecho	1813	485380	251771	772	Vulnerable
20	Derecho	1814	485268	251421	769	Deslizamiento
21	Derecho	1815	485250	250978	788	Deslizamiento
22	Derecho	1816	485101	250085	833	Intervenida/ Deslizamiento
23	Derecho	1817	484880	249809	849	Deslizamiento
24	Derecho	1818	484753	249584	858	Intervenida/ Deslizamiento
25	Derecho	1819	484316	248755	916	Intervenida

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

26	Izquierdo	1820	484288	248477	927	Intervenida
27	Derecho	1821	484282	248316	934	Deslizamiento
28	Derecho	1822	484474	247864	936	Intervenida
29	Izquierdo	1823	484018	247103	966	Intervenida
30	Derecho	1824	484137	246652	946	Intervenida
31	Derecho	1825	484755	245225	896	Deslizamiento
32	Derecho	1826	484700	244856	913	Deslizamiento
33	Izquierdo	1827	484497	244736	925	Vulnerable
34	Derecho	1828	484426	244612	934	Deslizamiento
35	Derecho	1829	484345	244221	944	Deslizamiento
36	Derecho	1830	484683	243764	936	Deslizamiento
37	Derecho	1830	484683	243764	936	Deslizamiento
38	Derecho	1831	485074	242757	1004	Deslizamiento
39	Derecho	-	485212	242735	-	Deslizamiento
40	Derecho	1832	484937	242460	984	Intervenida
41	Derecho	1833	484773	241974	1010	Deslizamiento
42	Derecho	1834	484968	241771	1010	Deslizamiento
43	Derecho	1835	484883	241141	999	Intervenida/ Deslizamiento
44	Derecho	1836	484704	241026	1042	Deslizamiento
45	Derecho	1837	484710	240145	1078	Intervenida/ Deslizamiento
46	Derecho	1838	484800	239922	1089	Intervenida
47	Izquierdo	1840	486086	238258	1168	Intervenida
48	Izquierdo	1841	486998	236283	1149	Intervenida/ Deslizamiento
49	Izquierdo	1842	487061	236232	1151	Intervenida/ Deslizamiento

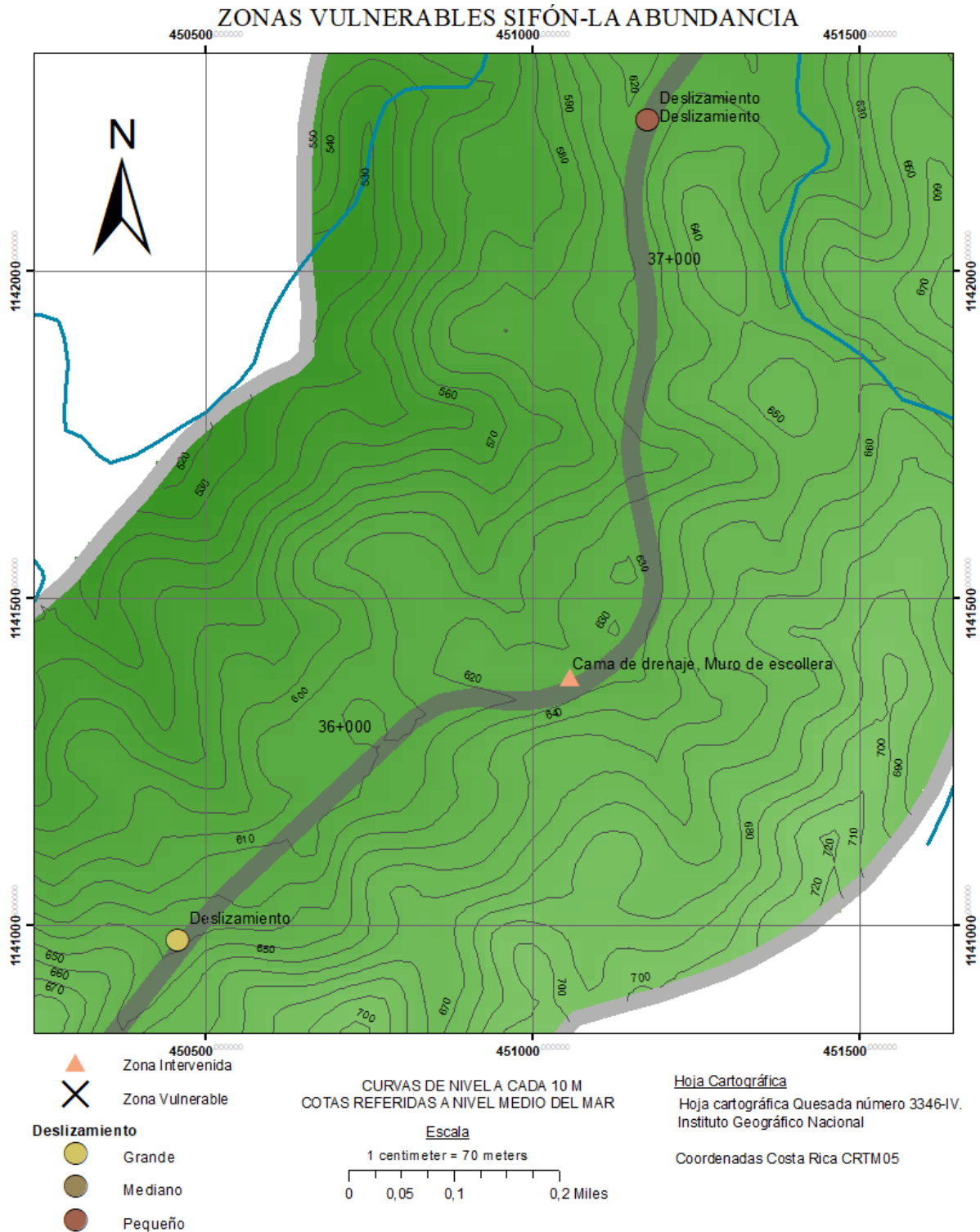
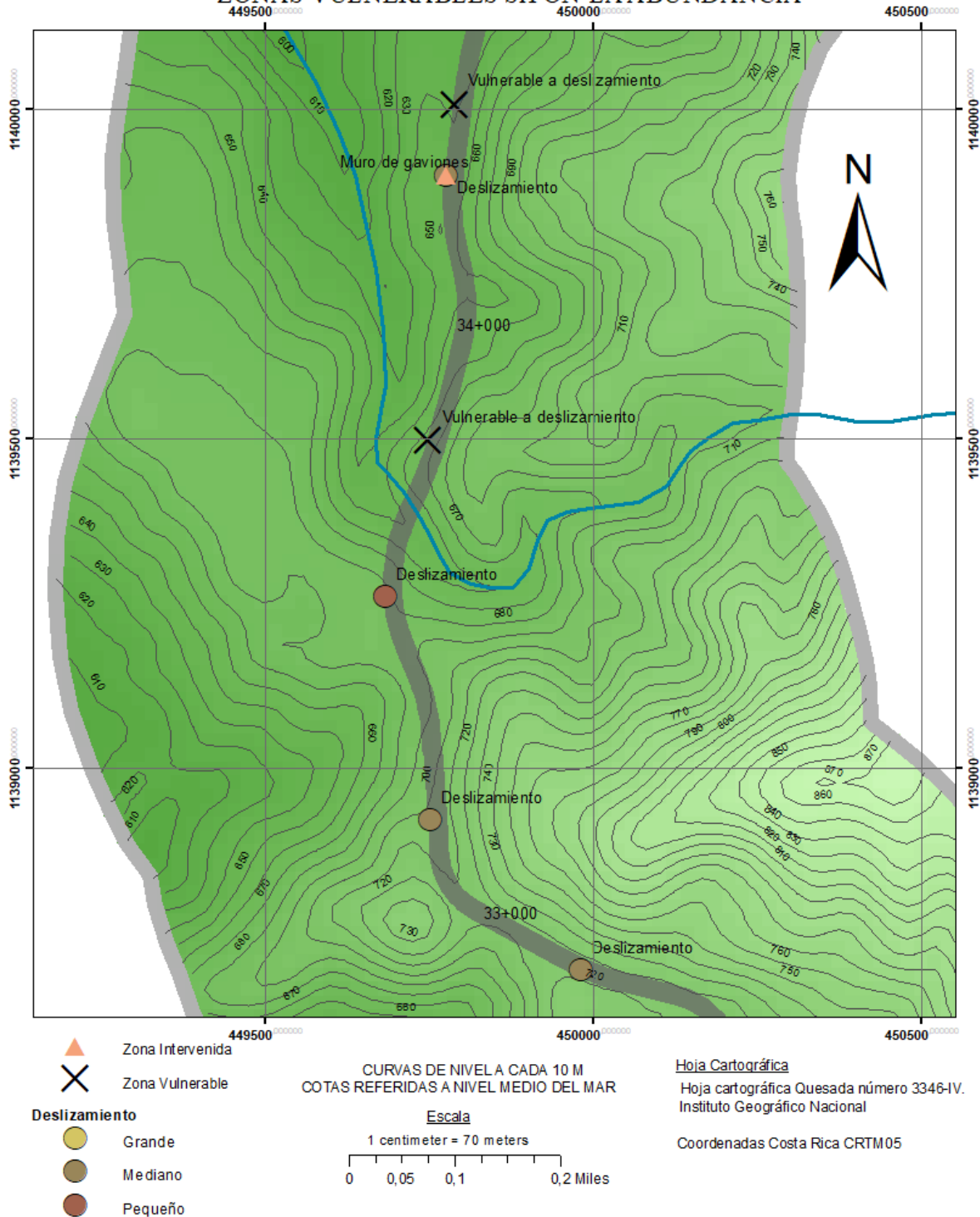


Figura 71. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia

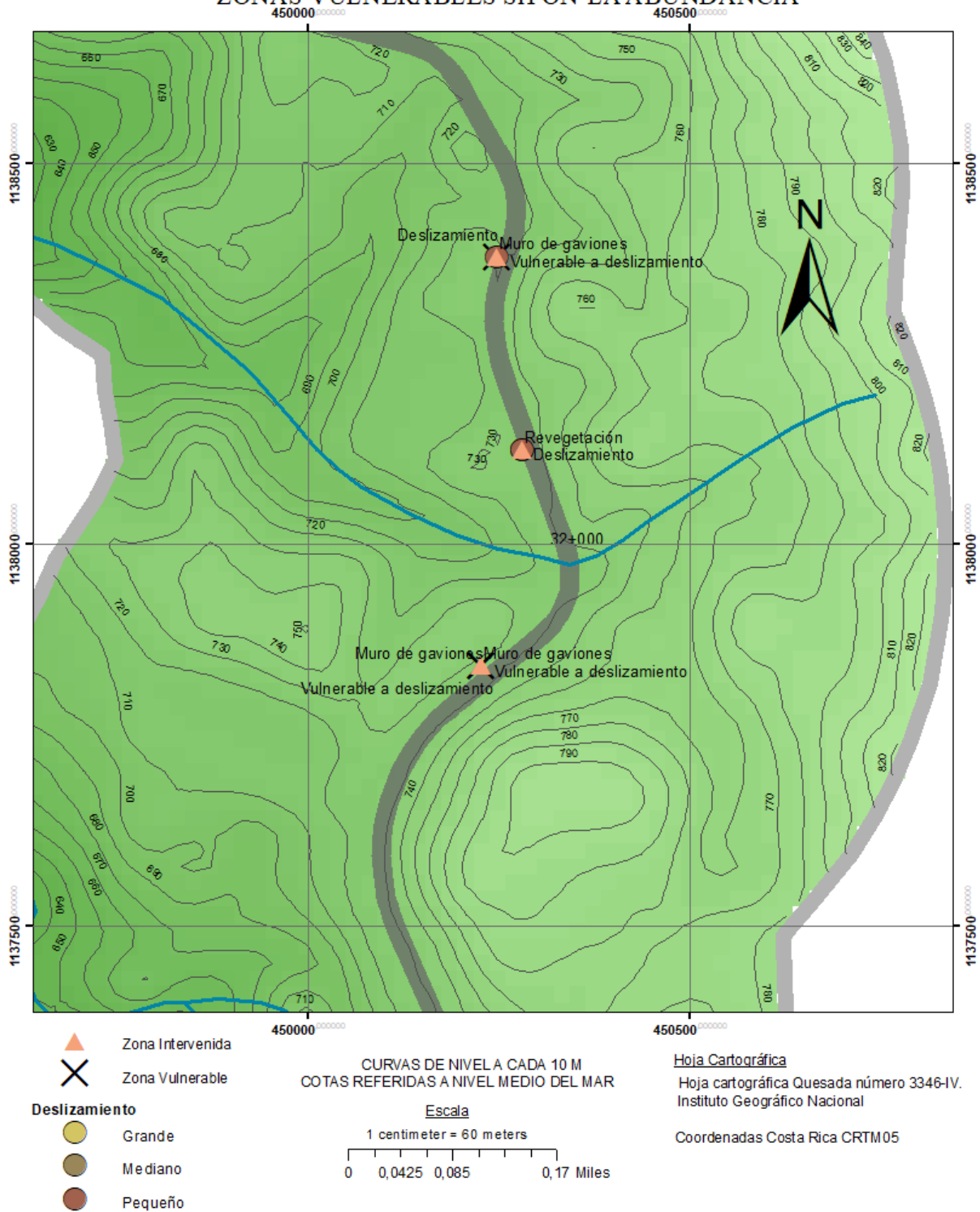
Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

## ZONAS VULNERABLES SIFÓN-LA ABUNDANCIA



*Figura 72. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia*

## ZONAS VULNERABLES SIFÓN-LA ABUNDANCIA



*Figura 73. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia*

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

## ZONAS VULNERABLES SIFÓN-LA ABUNDANCIA

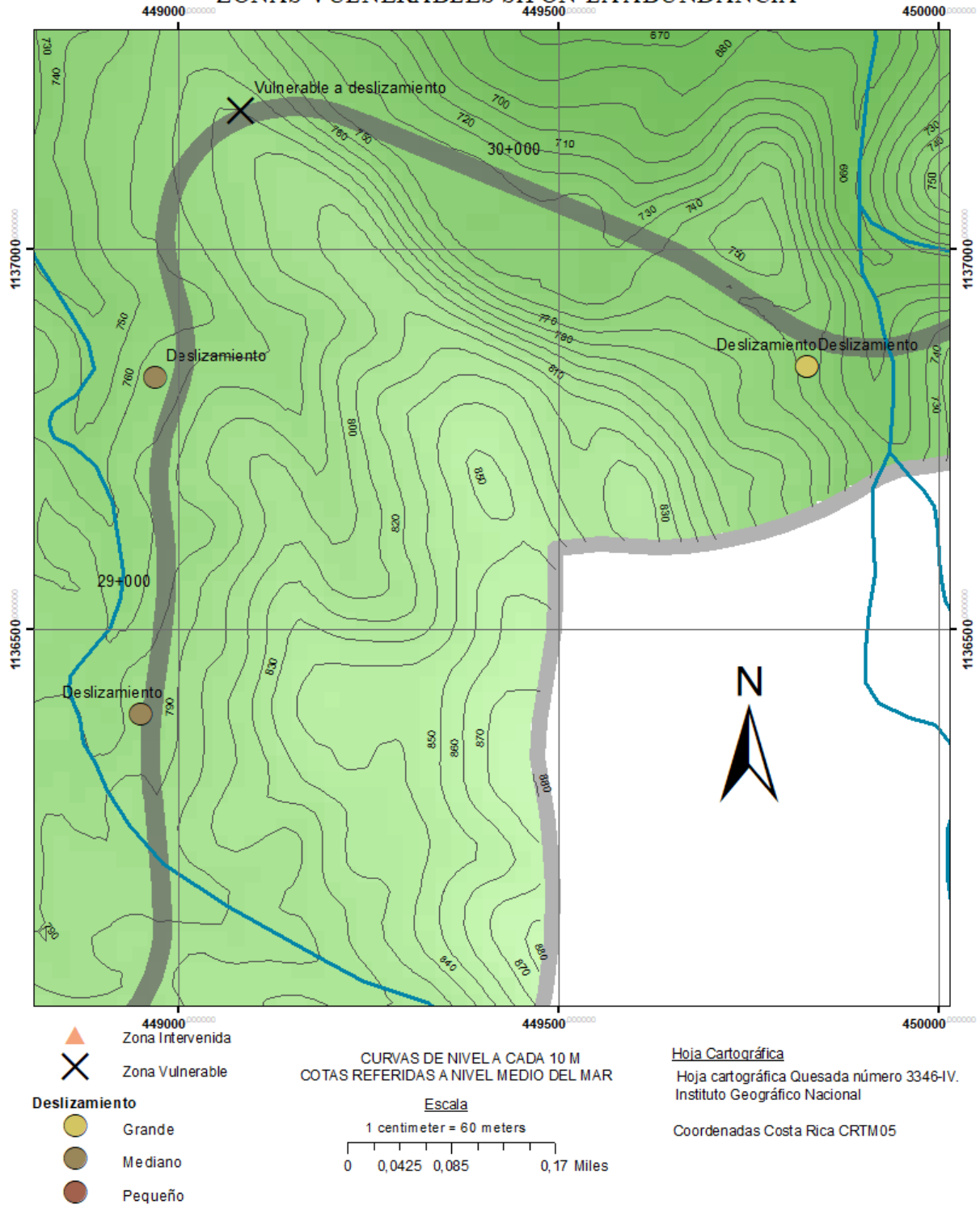


Figura 74. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia

## ZONAS VULNERABLES SIFÓN-LA ABUNDANCIA

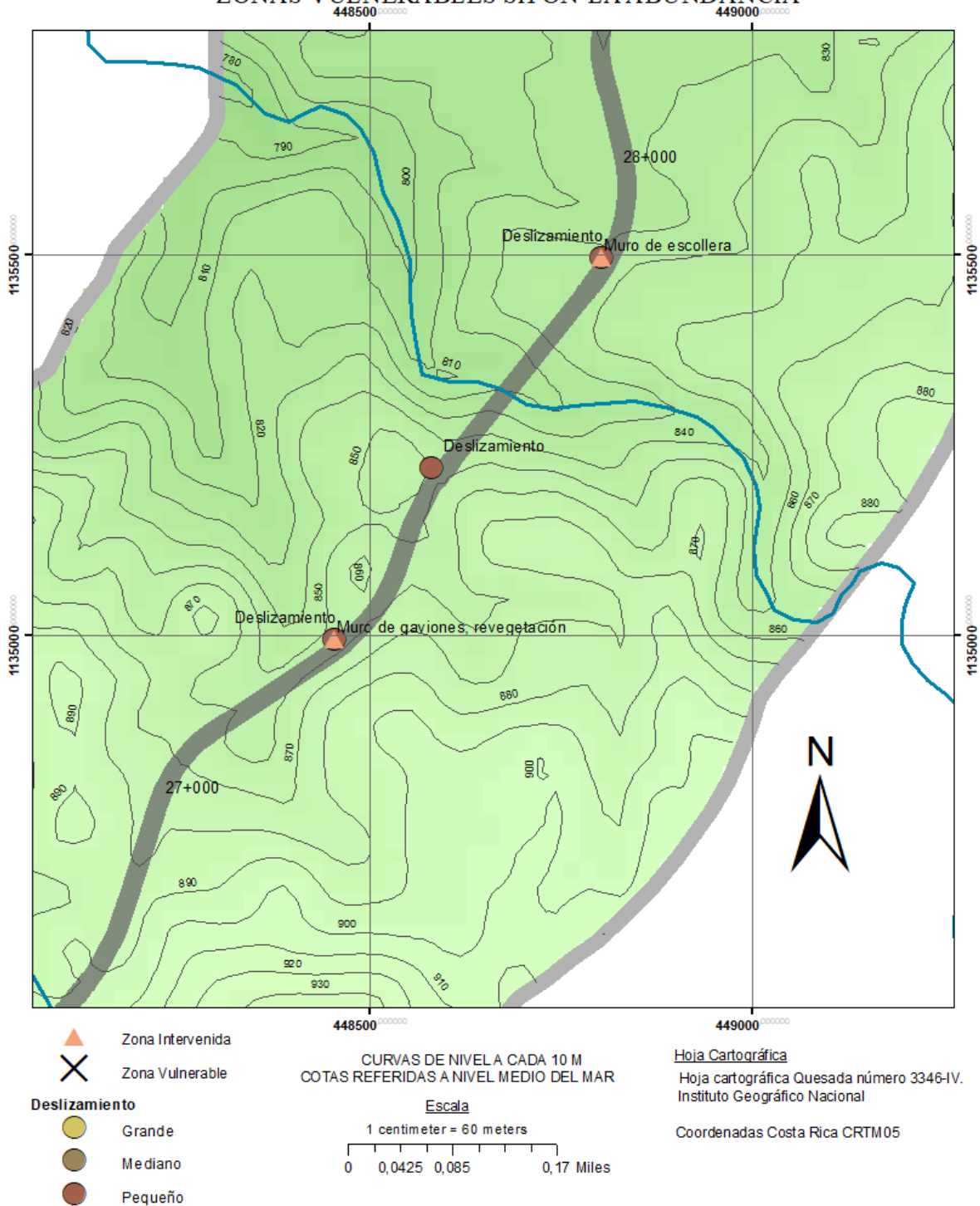


Figura 75. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

## ZONAS VULNERABLES SIFÓN-LA ABUNDANCIA

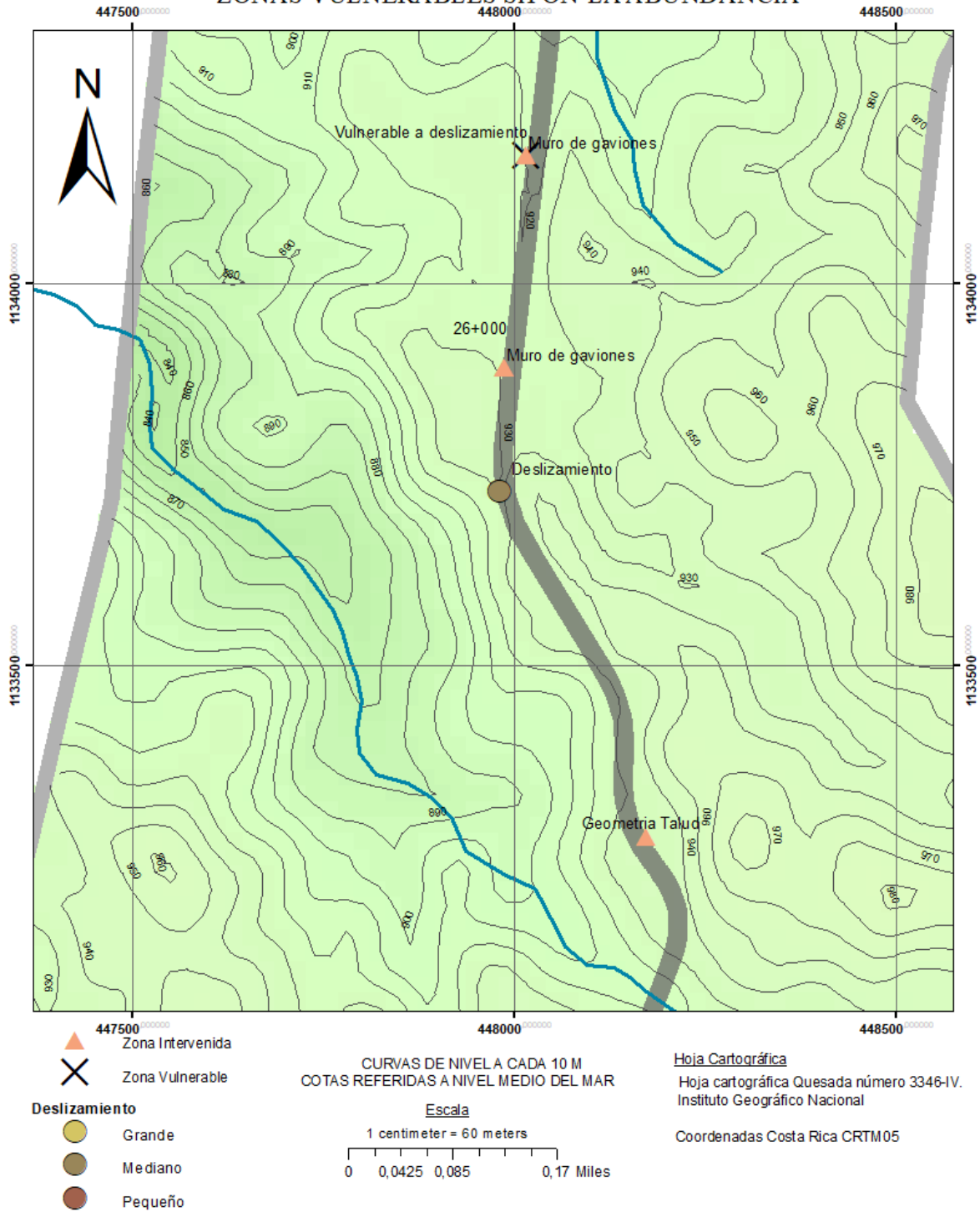


Figura 76. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia

## ZONAS VULNERABLES SIFÓN-LA ABUNDANCIA

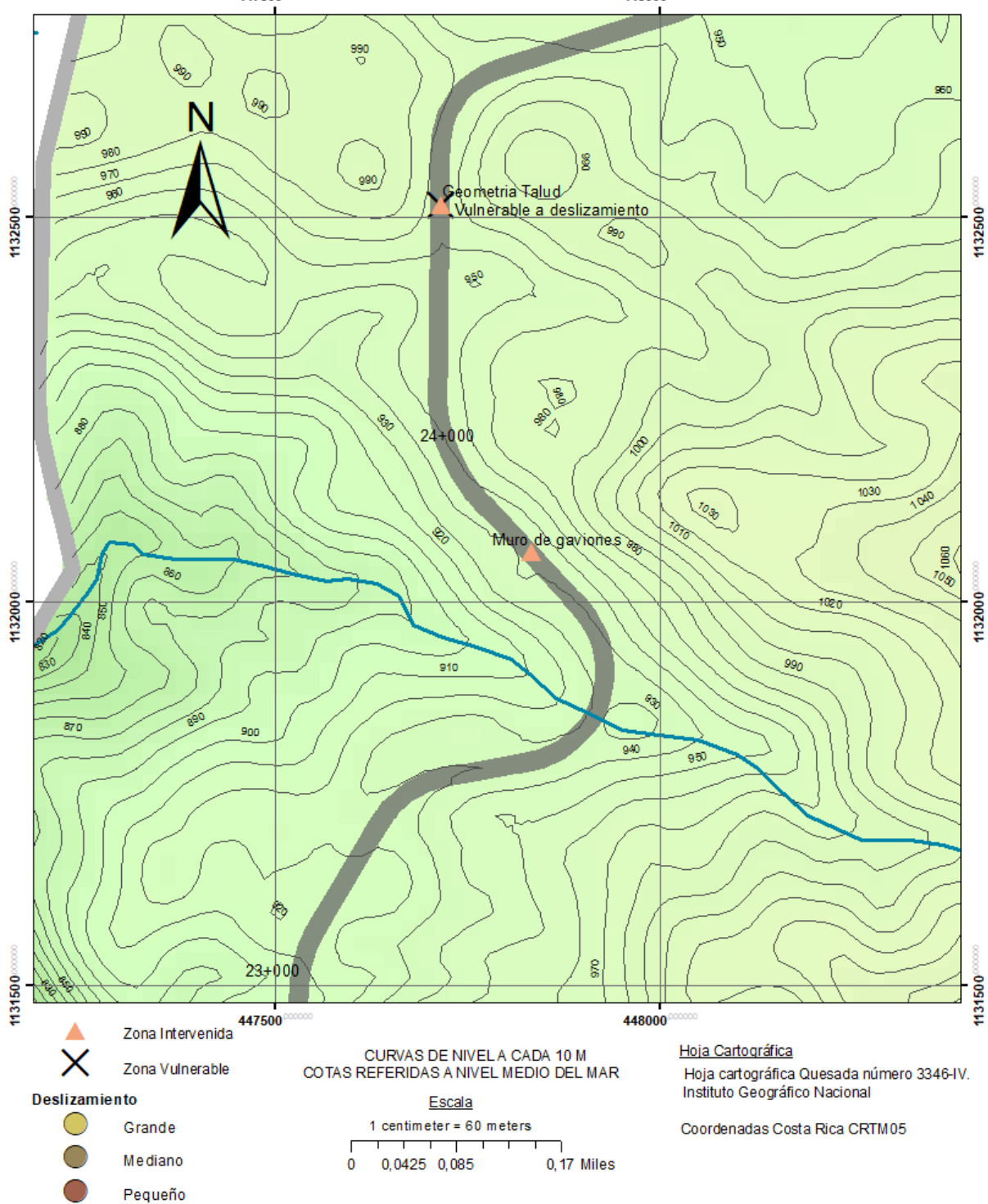


Figura 77. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

## ZONAS VULNERABLES SIFÓN-LA ABUNDANCIA

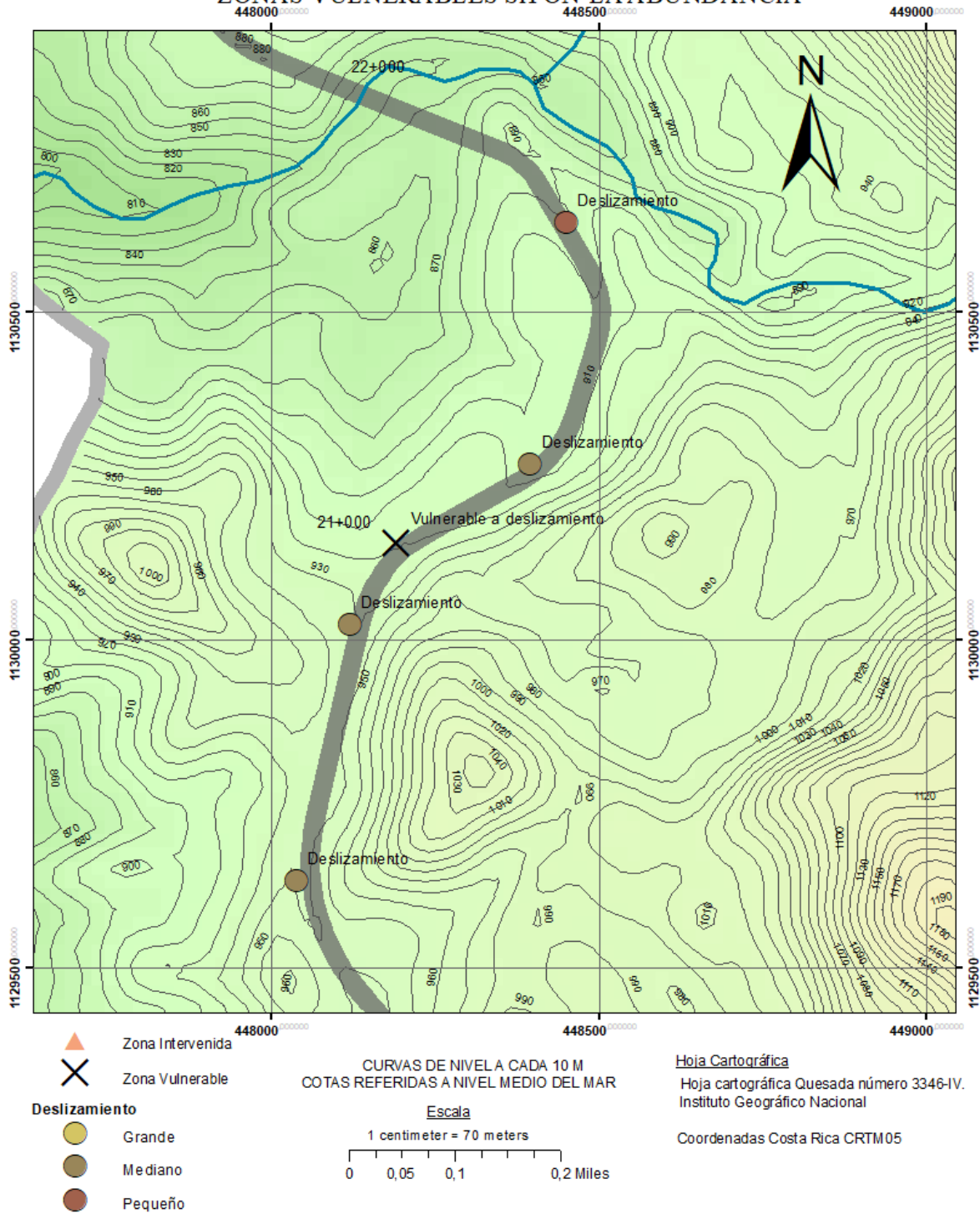


Figura 78. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia

## ZONAS VULNERABLES SIFÓN-LA ABUNDANCIA

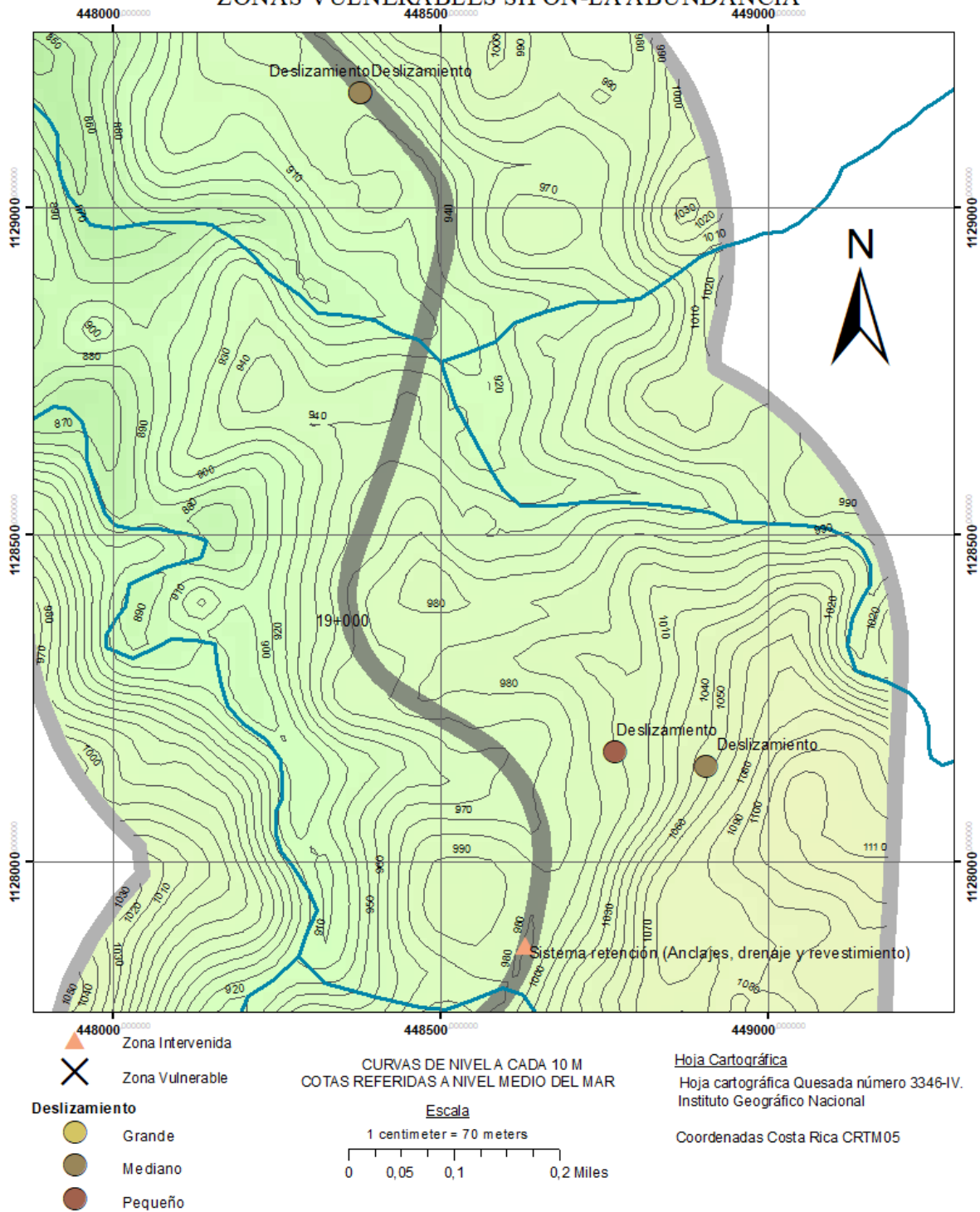


Figura 79. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.



## ZONAS VULNERABLES SIFÓN-LA ABUNDANCIA

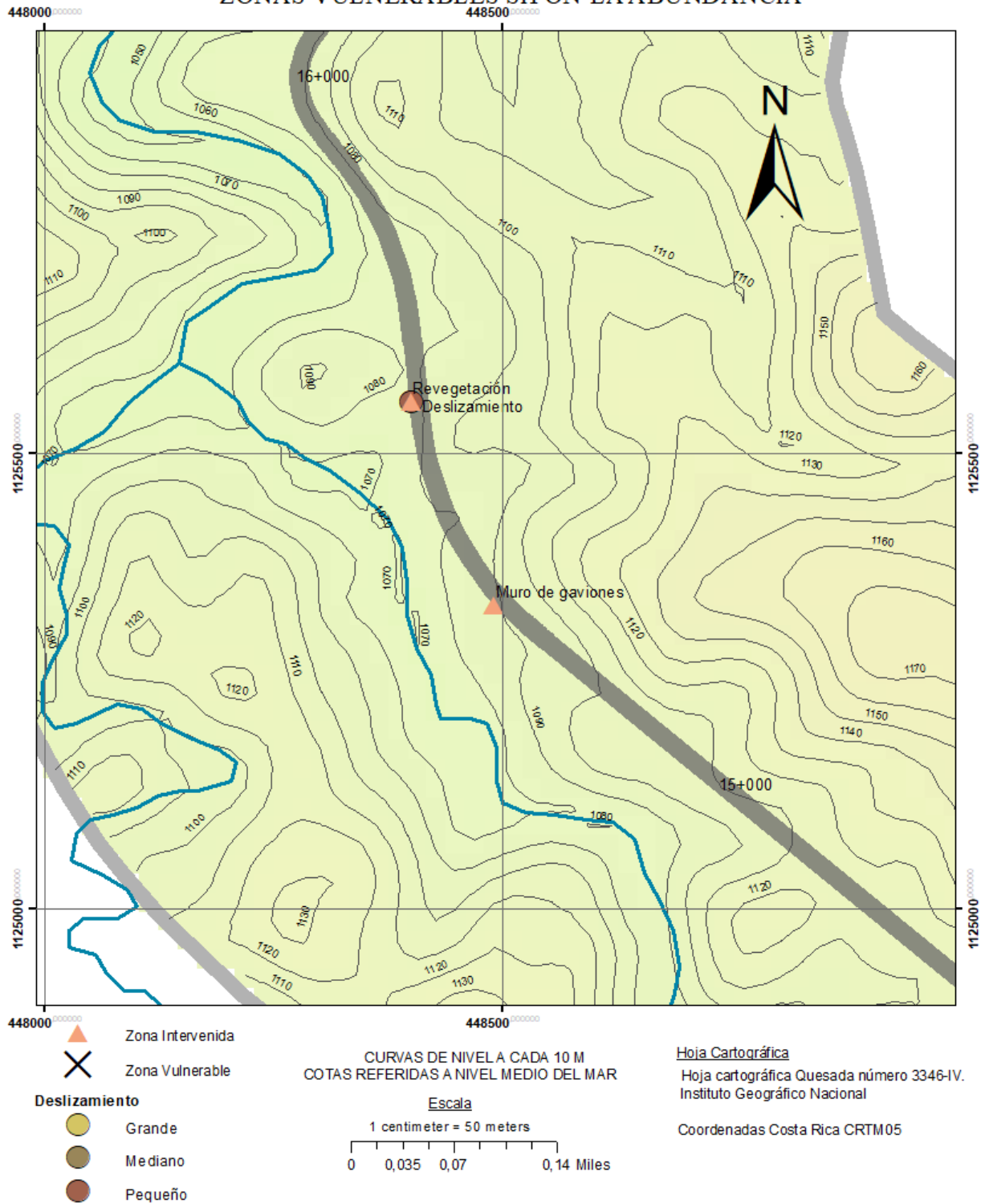


Figura 81. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

## ZONAS VULNERABLES SIFÓN-LA ABUNDANCIA

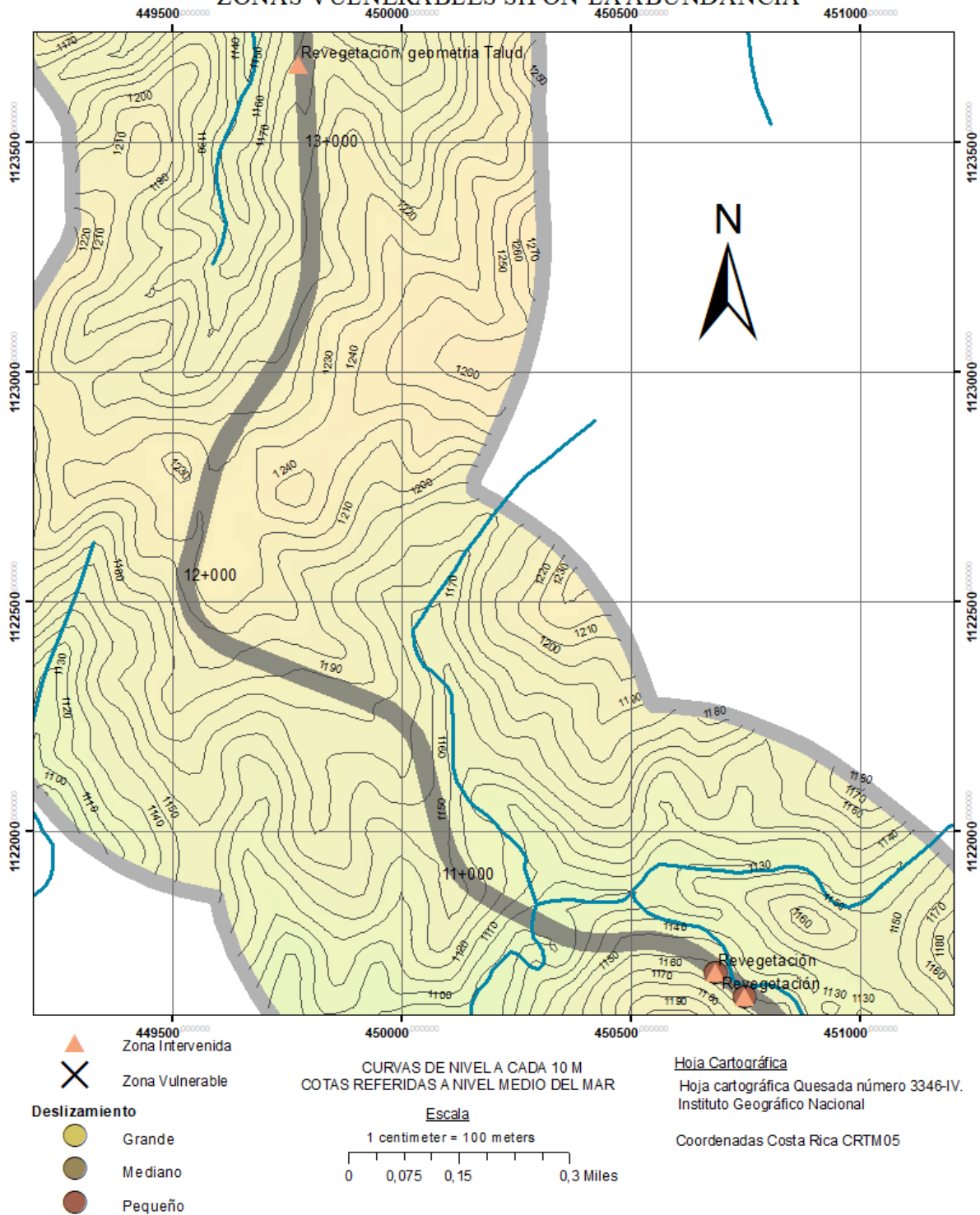


Figura 82. Mapa de ubicación de zonas vulnerables identificadas. Fuente: Elaboración propia

Cuadro 21 Clasificación de afectación en la vía por parte del total de zonas identificadas.

Zona	AFECTACIÓN EN LA VÍA (Escala 1 a 10)								
	Daño en cunetas	Material en la vía	Caída de Bloques	Obstrucción Vía	Grietas en la vía	Deslizamiento de vía	Destrucción de la vía	Daño vía secundaria	Daño propiedad
1	2	2	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	3	7	8	9	10	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	2	4	6	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	5
9	2	1	1	1	1	1	1	1	1
10	2	3	4	5	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	2	3	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	3	4
14	2	1	1	1	1	1	1	3	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	2	4	6	8	1	1	1	1	3
18	2	4	7	9	1	1	1	1	1
19	2	3	4	1	1	1	1	1	1
20	2	3	1	1	4	1	1	1	1
21	2	5	6	7	1	1	1	1	1
22	2	4	1	1	1	1	1	1	1
23	2	3	1	1	1	1	1	1	1
24	2	5	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	2	3	1	1	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29	2	3	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	2	3	6	7	1	1	1	1	1
32	2	3	3	1	1	1	1	1	1
33	1	1	1	1	1	1	1	1	2
34	2	2	1	1	1	1	1	1	1
35	2	3	4	5	7	9	10	1	10
36	2	2	3	1	6	1	1	1	1
37	2	2	3	1	6	1	1	1	1
38	2	2	2	1	1	1	1	1	2
39	2	3	5	7	1	1	1	1	3
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1
41	2	1	1	1	1	1	1	1	1
42	2	3	5	7	1	1	1	1	1
43	2	3	3	1	1	1	1	2	1
44	2	3	1	3	1	1	1	1	1
45	2	1	1	1	1	1	1	1	1
46	1	1	1	1	1	1	1	1	1
47	1	1	1	1	1	1	1	1	1
48	2	2	1	1	1	1	1	1	1
49	2	2	1	1	1	1	1	1	1

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

### Apéndice 3: Características generales y problemáticas de las zonas identificadas.

Cuadro 22 Características generales del total de zonas identificadas.

CARECTARIZACIÓN GENERAL DE ZONAS VULNERABLES						
Zona	Vegetación	Materiales presentes	Materiales deslizados	Condición Drenaje	Manejo de Aguas	Tipo de Relieve
1	Leve, arbustos	Suelos finos	Suelos finos	Húmeda	Existente (cunetas)	Ondulado
2	No hay vegetación	Suelos finos	Suelos finos	Húmeda	Existente (cunetas)	Ondulado
3	Media, arbustos	Suelos finos	No hay material deslizado	Húmeda	Cama de drenaje, recubierta con bloques	Ondulado
4	Media, arbustos y arboles	Suelos finos, limos y tobas	Suelos finos, limos y tobas	Húmeda	Inexistente	Montañoso
5	Media, arbustos	Suelos finos	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Montañoso
6	Leve, arbustos	Suelos finos, tobas blancas	Brechas finas	Húmeda	Inexistente	Montañoso
7	Leve, arbustos	Suelos rojizos, arcillosos, depósitos en forma de V	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Montañoso
8	Leve, arbustos	Suelos finos	Suelos finos	Húmeda	Inexistente	Ondulado
9	Media, arbustos	Suelos finos, arenas, y bloques de rocas	Suelos finos, bloques de roca, tobas y brechas	Húmeda	Inexistente	Ondulado
10	Media, arbustos	Suelos, roca	Suelos finos, bloques de roca	Saturado	Existente, temporal	Montañoso
11	No hay vegetación	Suelos finos	No hay material deslizado	Saturado	Existente (cunetas)	Montañoso
12	No hay vegetación	Suelos finos	Suelos finos	Saturado	Inexistente	Montañoso
13	Media, pasto	Limos rojizos, blancos y grises	Limos rojizos, blancos y grises	Saturado	Inexistente	Montañoso
14	Media, pasto	Limos rojizos, blancos y grises	Limos rojizos, blancos y grises	Saturado	Existente (cunetas)	Montañoso
15	Media, arbustos	Suelos finos	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Montañoso
16	Media, arbustos	Suelos finos	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Montañoso

17	No hay vegetación	Rocas intercaladas, suelo, suelos quemados	Bloques caídos	Rocas drenadas/ Suelos saturados	Inexistente	Montañoso
18	Leve, arbustos	Suelos finos	Suelos finos, bloques de roca pequeños	Saturado	Inexistente	Montañoso en la corona
19	No hay vegetación	Tobas blancas, lavas fracturada, suelos quemados	No hay material deslizado	Saturados con flujos	Existente (cunetas y drenajes)	Montañoso
20	Leve, arbustos	Suelos finos, tobas blancas y cafés	Suelos finos, tobas blancas y cafés	Húmeda	Inexistente	Ondulado
21	Leve, arbustos	Suelos Blandos	Suelos y bloques de piedra	Saturado	Inexistente	Ondulado
22	Leve, arbustos	Suelos finos	Suelos finos	Saturado	Inexistente	Ondulado
23	No hay vegetación	Suelos finos	Suelos finos	Saturado	Inexistente	Ondulado
24	Media, arbustos	Tobas pumitica blancas, cenizas blancas. Suelos finos	Tobas pumitica blancas, cenizas blancas, Suelos finos	Saturado	Inexistente	Ondulado
25	Pasto	Suelos blandos, blancos y rojizos	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Montañoso
26	No hay vegetación	Suelos blandos, blancos y rojizos	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Montañoso
27	Arbustos	Suelos blandos	Suelos blandos	Saturado	Inexistente	Montañoso
28	Media, pastos y arbustos	Suelos finos	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Montañoso
29	No hay vegetación	Suelos finos	No hay material deslizado	Saturado	Inexistente	Montañoso
30	Media, arbustos	Suelos finos	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Montañoso
31	Media, pasto y arbustos	Suelos Finos	Suelos blandos sobre roca	Húmeda	Inexistente	Montañoso
32	Media, arbustos y arboles	Tobas, suelos, brechas. Sección	Suelos finos	Saturado	Inexistente	Montañoso

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

		rocosa				
33	pasto y arbustos	Sin descripción	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Ondulado
34	Leve, arbustos	Suelos finos, arenas y bloques de roca	Suelos finos, arenas y bloques de roca	Saturado	Inexistente	Montañoso
35	Alta, pasto, arbustos y arboles	Suelos finos, materiales limosos y arcillosos	Suelos finos	Saturado	Inexistente	Montañoso
36	Media, pastos y arbustos	Suelos finos, bloques roca	suelos finos y pequeños bloques de roca	Saturado	Inexistente	Montañoso
37	Media, pastos y arbustos	Suelos finos, bloques roca	suelos finos y pequeños bloques de roca	Saturado	Inexistente	Montañoso
38	Leve, pasto	suelos finos y pequeños bloques de roca	suelos finos y pequeños bloques de roca	Saturado	Inexistente	Montañoso
39	Leve, pasto	Suelos Finos	Suelos Finos	Húmeda	Inexistente	Montañoso
40	Media, arbustos y pasto	Sin descripción	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Montañoso
41	Leve, arbustos	Suelos Finos	Suelos Finos	Húmeda	Existente, sistema conducción agua	Montañoso
42	Leve, arbustos	Suelos Finos	Suelos Finos	Húmeda	Inexistente	Montañoso
43	Leve, arbustos	Macizo Rocoso, Suelo	Bloques caídos y suelos finos	Saturado	Inexistente	Montañoso
44	No	Suelos finos	Suelos finos	Saturado con flujos	Inexistente	Montañoso
45	Media, pasto	Suelos finos	Suelos finos	Húmeda	Existente (cunetas)	Ondulado
46	Media, pasto	Suelos finos	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Ondulado
47	Media, pasto	Suelos finos	No hay material deslizado	Húmeda	Inexistente	Ondulado
48	Leve, pasto	Suelos finos	Suelos finos	Húmeda	Inexistente	Montañoso
49	Leve, pasto	Suelos finos	Suelos finos	Húmeda	Inexistente	Montañoso

Cuadro 23 Problemas e intervenciones identificados en la totalidad de zonas vulnerables.

<b>PROBLEMÁTICA Y SOLUCIONES EN ZONAS VULNERABLES</b>				
Zona	Problemas Observados	Mecanismo Impulsor	Afectación de Vía	Soluciones realizadas
1	características geotécnicas de los materiales	Erosión	No hay afectación	No se han implementado
2	características geotécnicas de los materiales	Erosión	No hay afectación	No se han implementado
3	Problemas de drenaje	-	No hay afectación	Cama de drenaje, muro de escollera
4	Zona inestable, deslizamiento grande.	Mal manejo de aguas	Hay alta afectación	No (Soluciones planteadas)
5	Pendiente alta	Mal manejo de aguas	Posible afectación	Geometría diseño/Talud
6	Arrastre de coluvios, erosión diferencial	Mal manejo de aguas	Posible afectación	Muro de gaviones enterrado
7	Erosión en el terreno	Erosión, mal manejo de aguas	Posible afectación	Geometría diseño/Talud
8	Deslizamiento que afecta calle secundaria	Mal manejo de aguas	Posible afectación	No se han implementado
9	Deslizamiento	Características de materiales, mal manejo de aguas	hay alta afectación	No (Soluciones planteadas)
10	Zonas alteradas	Mal manejo de agua, erosión, materiales meteorizados.	hay alta afectación	Geometría diseño/Talud
11	Erosión en el terreno	Erosión	No hay afectación	Muro de gaviones
12	Deslizamiento pequeño	Erosión	No hay afectación	No se han implementado
13	Zonas alteradas	Erosión, fallo en el sistema de manejo de aguas	Posible afectación	Geometría diseño/Talud
14	Zonas alteradas	Erosión corta las cunetas	Posible afectación	Revegetación
15	Zona vulnerable sobre segunda berma	Erosión	No hay afectación	Muro de gaviones
16	Pequeño deslizamiento	Erosión	No hay afectación	Muro de gaviones
17	Caída de bloques, con necesidad de intervención	Características de materiales	Si hay afectación	No (Soluciones planteadas)
18	Inestable	Erosión del suelo, abundantes grietas	Si hay afectación	No (Soluciones planteadas)
19	Fracturas geológicas	Alta pendiente, suelos blandos.	Posible afectación	Geometría diseño/Talud
20	Presencia de suelos arcillosos y finos, saturados	Erosión, mal drenaje, suelos saturados	hay baja afectación	No se han implementado
21	Deslizamiento traslación	Suelos blandos, saturados, nivel freático en superficie	Posible afectación	No (Soluciones planteadas)

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

22	Deslizamiento suelo	Saturación del suelo	hay baja afectación	Escollera
23	Material desplazado	Erosión, presencia de suelos finos como limos, arcillas y cenizas	No hay afectación	No se han implementado
24	Deslizamiento	Saturación del suelo, Características de materiales	Si hay afectación	Muro de gaviones, revegetación al costado
25	Vulnerabilidad en los bordes	Erosión	No hay afectación	Muro de gaviones
26	No se observan problemas	-	No hay afectación	Muro de gaviones
27	Suelo fracturado	Saturación de los suelos, suelos fracturados (al secarse se abren)	hay baja afectación	No se han implementado
28	No se observan problemas	-	No hay afectación	Geometría diseño/Talud
29	Geología de la zona, suelos muy finos	Erosión, Saturación Suelos, manejo de aguas inexistente	Si hay afectación	Geometría diseño/Talud
30	No se observan problemas	-	No hay afectación	Gaviones
31	Materiales desfavorables, suelos blandos	No hay control de agua, se tiene un drenaje superficial	No hay afectación	Geometría diseño/Talud
32	Afectación de la carretera, al margen de la calzada.	Gravedad del peso propio, Saturación del terreno	Si hay afectación	No se han implementado
33	Movimiento de masa, posible afectación de la vía y zonas vecinas	Saturación de las escombreras, mal drenaje	Posible afectación	No se han implementado
34	Afectación de la vía por deslizamiento	Saturación, erosión, mal manejo aguas	Posible afectación	No se han implementado
35	Deslizamiento grande de masa de suelo, flujos de agua, saturación	Saturación, gravedad por peso propio, características de materiales	hay alta afectación	No (Soluciones planteadas)
36	Formación de lagunas y deslizamiento. Grieta evidente en el terreno.	Saturación del suelo, Características de materiales	hay alta afectación	No (Soluciones planteadas)
37	Formación de lagunas y deslizamiento. Grieta evidente en el terreno.	Saturación del suelo, Características de materiales	hay alta afectación	No (Soluciones planteadas)
38	Problemas de erosión en la parte superior y deslizamientos en el pie	Saturación del suelo, erosión, inexistencia de manejo de aguas	Posible afectación	Geometría diseño/Talud
39	Problemas de erosión, deslizamientos pequeños	Suelos húmedos, erosión, inexistencia de manejo de aguas	Posible afectación	No (Soluciones planteadas)
40	No se observan problemas	-	No hay afectación	Anclajes, drenajes y revestimiento

41	Materiales desplazados	Alta pendiente, saturación de suelos, falla del sistema de conducción de agua.	Posible afectación	No se han implementado
42	Materiales desplazados	Alta pendiente, Características de materiales	No hay afectación	No (Soluciones planteadas)
43	Desprendimiento de sistema de retención, caída de bloques	Alta pendiente, materiales, saturación del terreno	hay media afectación	Sistema de retención y anclajes (No funcionó)
44	Deslizamientos grandes, flujos de agua, arrastre de material	Saturación de suelos, mal manejo de aguas, sistemas inexistentes de drenajes, altas pendientes, materiales blandos	hay alta afectación	Sistema de retención de sedimentos temporal
45	Movimiento de masa de suelo, deslizamiento en la corona	Suelos finos saturados	No hay afectación	Sistema de revegetación (No funcionó)
46	No se observan problemas	-	No hay afectación	Muro de gaviones
47	No se observan problemas	-	No hay afectación	Revegetación, geometría de diseño
48	Deslizamiento de suelos finos, afectación de la cuneta leve	Alta pendiente, suelos blandos	hay baja afectación	Revegetación (No funcionó)
49	Deslizamiento de suelos finos, afectación de la cuneta leve	Alta pendiente, suelos blandos	hay baja afectación	Revegetación (No funcionó)

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

#### Apéndice 4. Caracterización y Clasificación general de zonas críticas (13 zonas estudiadas).

Cuadro 24 Clasificación de zonas críticas según tipo de derrumbe.

Clasificación de tipo de derrumbe según características de zonas críticas					
Estación	Material	Condición Material	Condición de Saturación	Superficie deslizamiento	Tipo de derrumbe
17+400	Suelo	Sin grietas	húmedo	Suelo-Suelo	Deslizamiento compuesto
18+600	Suelo	Con grietas	húmedo	Suelo-Suelo	Corte
19+800	Suelo / Relleno	Cohesivo y Con grietas	húmedo	Suelo-Suelo	Deslizamiento compuesto
20+050	Suelo/Relleno	Cohesivo y Con grietas	húmedo	Suelo-Suelo	Deslizamiento compuesto
20+800	Suelo/Suelo	Suelos poco cohesivos	Saturado	Suelo-Suelo	Deslizamiento compuesto
21+050	Suelo	Cohesivo con bloques	húmedo	Roca-Suelo	Corte
21+640	Suelo/Roca	Rocas poco fracturadas y meteorizadas y suelos cohesivos	Flujo de agua intermedio	Roca-Suelo	Deslizamiento compuesto
29+100	Suelo/Roca	Roca con bloques, suelo cohesivo	húmedo	Suelo-Suelo	Deslizamiento traslación
30+700	Suelo/Roca	Suelo poco cohesivo con grietas, roca en bloques	Saturado/Flujo de agua intermedio	Suelo-Suelo	Deslizamiento traslación
31+100	Suelo/Roca	Roca en volcamiento, fracturada y en bloques	Saturado	Roca-suelo	Corte
33+800	Suelo/Roca	Roca poco fracturada, meteorizada y suelos cohesivos	húmedo	Roca-suelo	Deslizamiento compuesto
34+770	Suelo	suelos cohesivos y con bloques	húmedo	Suelo-Suelo	Deslizamiento rotacional
36+130	Suelo/Roca	Rocas meteorizadas, poco fracturada, bloques, suelos cohesivos, con grietas.	Saturado/Flujo de agua intermedio	Roca-suelo	Deslizamiento compuesto

Cuadro 25 Características geométricas de zonas críticas estudiadas.

Características Geométricas de zonas críticas					
Estación	Pendiente	Ancho (m)	Altura (m)	Longitud (m)	Dirección de masa
17+400	66,88%	113	60	114	S19°O@66,88
18+600	58,09%	183	106	219	S55°E@58,09
19+800	62,26%	32	55	103	S47°O@62,26
20+050	37,94%	34	53	154	S38°O@37,94
20+800	55,00%	235	42	114	S67°O@55,00
21+050	50,82%	127	44	95	S48°E@50,82
21+640	63,50%	24	19	29	S86°O@63,50
29+100	26,89%	131	44	168	S81°E@26,89
30+700	36,29%	103	35	102	S21°O@36,29
31+100	74,76%	145	72	123	S32°E@74,76
33+800	45,21%	41	34	82	S73°E@45,21
34+770	60,34%	49	28	54	S86°E@60,34
36+130	40,39%	45	20	54	S40°E@40,39

Cuadro 26 Volumen de masa desplazada.

Clasificación de deslizamiento según masa desplazada en zonas críticas estudiadas						
Sitio	Ancho (m)	Profundidad (m)	Longitud (m)	Factor hinchamiento	Volumen (m3)	Material desplazado
17+400	113	10	114	1,27	87199	mediana
18+600	-	-	-	-	-	-
19+800	40	6	103	1,27	16284	pequeña
20+050	37	10	154	1,27	39697	pequeña
20+800	235	11	114	1,27	195788	mediana
21+050	-	-	-	-	-	-
21+640	24	3	29	1,27	1547	muy pequeña
29+100	131	13	168	1,27	197071	mediana
30+700	88	7	103	1,27	42511	mediana
31+100	-	-	-	-	-	-
33+800	41	5	72	1,27	8925	pequeña
34+770	49	6	54	1,27	9819	pequeña
36+130	45	11	54	1,27	17235	pequeña

Cuadro 27 Clasificación preliminar de zonas críticas ante posibles movimientos.

<b>Clasificación preliminar del territorio frente a posibles movimientos</b>				
Estación	Presencia de movimientos	Tipo de Material	Rango Pendientes	Condición
17+400	Con Movimientos Antiguos	Depósitos superficiales susceptibles	40%-70%	Inestable
18+600	Sin movimientos activos o antiguos	Depósitos superficiales no susceptibles	40%-55%	Moderado estable
19+800	Con Movimientos Antiguos	Depósitos superficiales susceptibles	45%-65%	Inestable
20+050	Con Movimientos Antiguos	Depósitos superficiales susceptibles	30%-60%	Inestable
20+800	Con Movimientos Activos	Sustrato inestable	30%-55%	Inestable
21+050	Con Movimientos Antiguos	Sustrato Susceptible	50%-80%	Moderado inestable
21+640	Con Movimientos Antiguos	Depósitos superficiales susceptibles	50%-70%	Inestable
29+100	Con Movimientos Antiguos	Depósitos superficiales susceptibles	25%-35%	Inestable
30+700	Con Movimientos Antiguos	Sustrato Susceptible	30%-45%	Inestable
31+100	Sin movimientos activos o antiguos	Depósitos superficiales no susceptibles	60%-80%	Moderado estable
33+800	Con Movimientos Antiguos	Depósitos superficiales susceptibles	45%-60%	Inestable
34+770	Con Movimientos Antiguos	depósitos superficiales susceptibles	40%-65%	Inestable
36+130	Con Movimientos Activos	Sustrato inestable	35%-75%	Inestable

Cuadro28 Resultados de factores condicionantes y desencadenantes en zonas críticas.

Características de Zonas Críticas										
Estación	Pendiente	Altura	Materiales	Meteorización	Deforestación	Condición humedad	Volumen (m³)	Socavación	Alteración hidrotermal	Erosión
17+400	67%	60 m	Medio	Media	Poca vegetación	Húmedo	87199 m³	Nula	Nula	Media
18+600	58%	106 m	Medio	Media	Poca vegetación	Húmedo	-	Nula	Nula	Media
19+800	62%	55 m	Suelto/Suave	Media	Media vegetación	Saturado	16284 m³	Baja	Intermedia	Media
20+050	38%	53 m	Suelto/Suave	Media	Media vegetación	Saturado	39697 m³	Baja	Intermedia	Media
20+800	55%	42 m	Suelto/Suave	Alta	Media vegetación	Flujo de agua	195788 m³	Alta	Nulo	Alta
21+050	51%	44 m	Medio	Media	Alta vegetación	Saturado	-	Nula	Desarrollado	Media
21+640	64%	19 m	Medio	Media	Media vegetación	Húmedo	1547 m³	Media	Nulo	Media
29+100	27%	44 m	Suelto/Suave	Media	Poca vegetación	Húmedo	197071 m³	Baja	Nulo	Alta
30+700	36%	35 m	Suelto/Suave	Alta	No hay vegetación	Flujo de agua	42511 m³	Baja	Desarrollado	Alta
31+100	75%	72 m	Medio	Baja	No hay vegetación	Saturado	-	Baja	Nulo	Baja
33+800	45%	34 m	Medio	Media	Alta vegetación	Húmedo	8925 m³	Baja	Nulo	Baja
34+770	60%	28 m	Medio	Baja	Media vegetación	Saturado	9819 m³	Alta	Iniciando	Media
36+130	40%	20 m	Suelto/Suave	Alta	Media vegetación	Flujo de agua	17235 m³	Alta	Nulo	Alta

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

## Apéndice 5. Caracterización geológica y geotécnica de materiales de zonas críticas:

Cuadro 29 Caracterización de materiales según geología y granulometría.

Materiales con mayor presencia en zonas críticas	Unidad geológica	Zonas con presencia de material
<b>Arena con limos (SM)</b>	<b>Toba pumitica</b>	17+400
		18+600
		29+100
		34+770
	toba compacta	17+400
	Toba Lapílica	18+600
	Tobitas	20+800
		21+640
	<b>Igimbrita</b>	20+800
		21+050
		21+640
	Aluviones	20+800
	Toba pumitica de flujo	21+050
		31+100
	Toba soldada	29+100
	Auto brecha de lava	30+700
	Paleosuelo quemado	30+700
	Lava	31+100
	<b>Brecha</b>	20+800
		21+640
31+100		
34+770		
Toba	29+100	
Brecha lávica alterada	34+770	
Flujo pumitico	36+130	

Cuadro 30 Caracterización de materiales según geología y granulometría.

<b>Arena limosa con limos de alta plasticidad (SM-MH)</b>	<b>Toba ceniza</b>	17+400
		19+800
		20+050
		29+100
	Toba lapilli consolidada	17+400
	Toba pumitica inferior	18+600
	Facies brecha media	19+800
		20+050
	Facies Brecha arcillosa	19+800
		20+050
	Facies Brecha gruesa	19+800
		20+050
	Flujo de lodo	30+700
Tobas	30+700	
Tobas Vari colores	34+770	

Cuadro 31 Caracterización de materiales según geología y granulometría.

<b>Arena con arcillas y limos (SC-SM)</b>	Depósitos hidrotermalizados	18+600
		29+100
	<b>Tobas</b>	20+800
		21+050
		31+100
		18+600
	Alteración hidrotermal	29+100
		29+100
	Tobas líticas	29+100
	Toba cinerítica	30+700
	Tobas vari colores	34+770
Ceniza no consolidada	36+130	
Facies flujo de ceniza	36+130	

## Apéndice 6. Análisis Geotécnico de zonas críticas

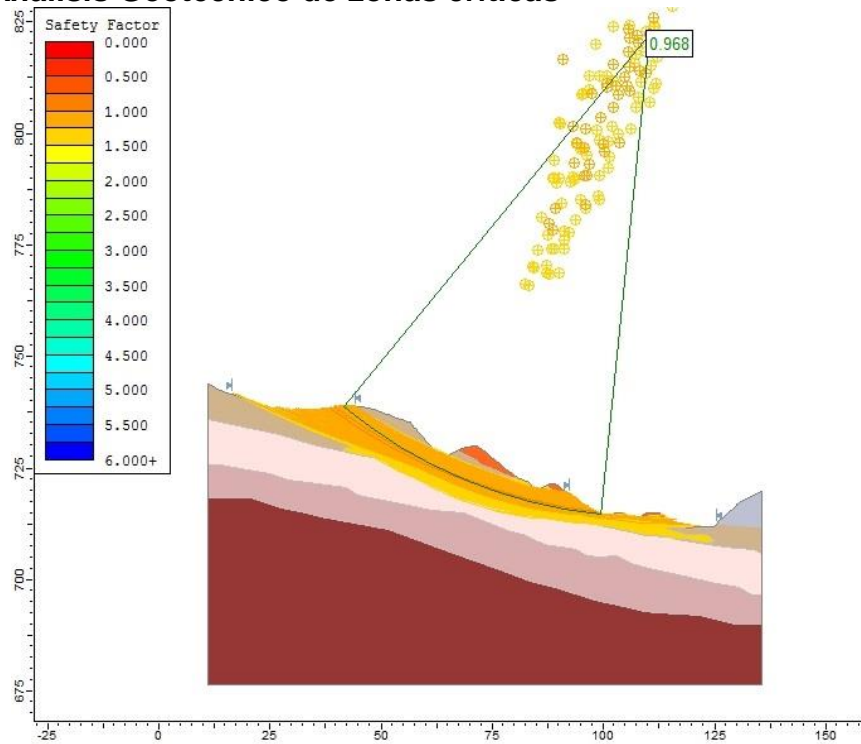


Figura 83. Análisis Global Estático Perfil A1-A1'

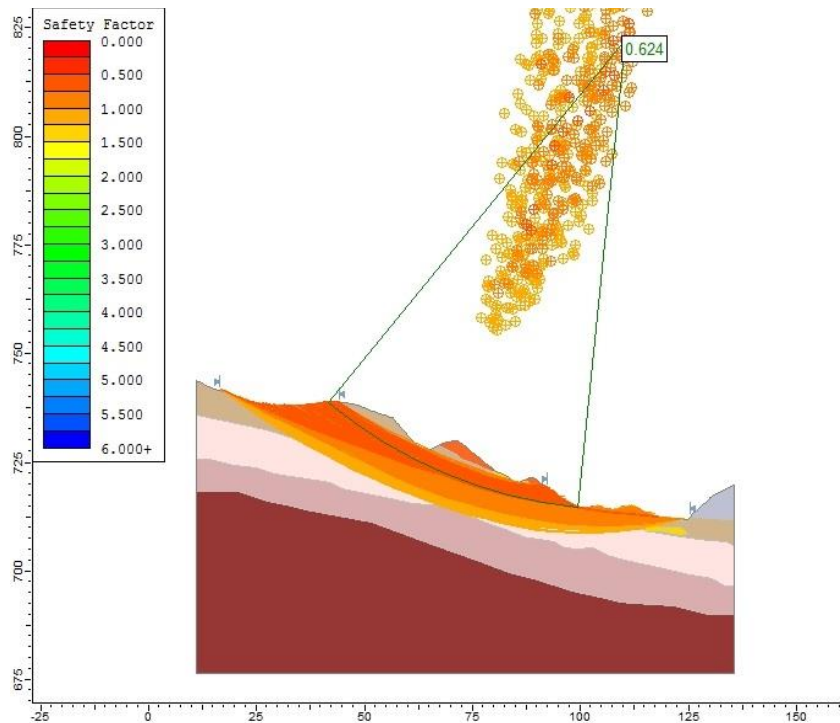


Figura 84. Análisis Global Pseudo-estático Perfil A1-A1'.

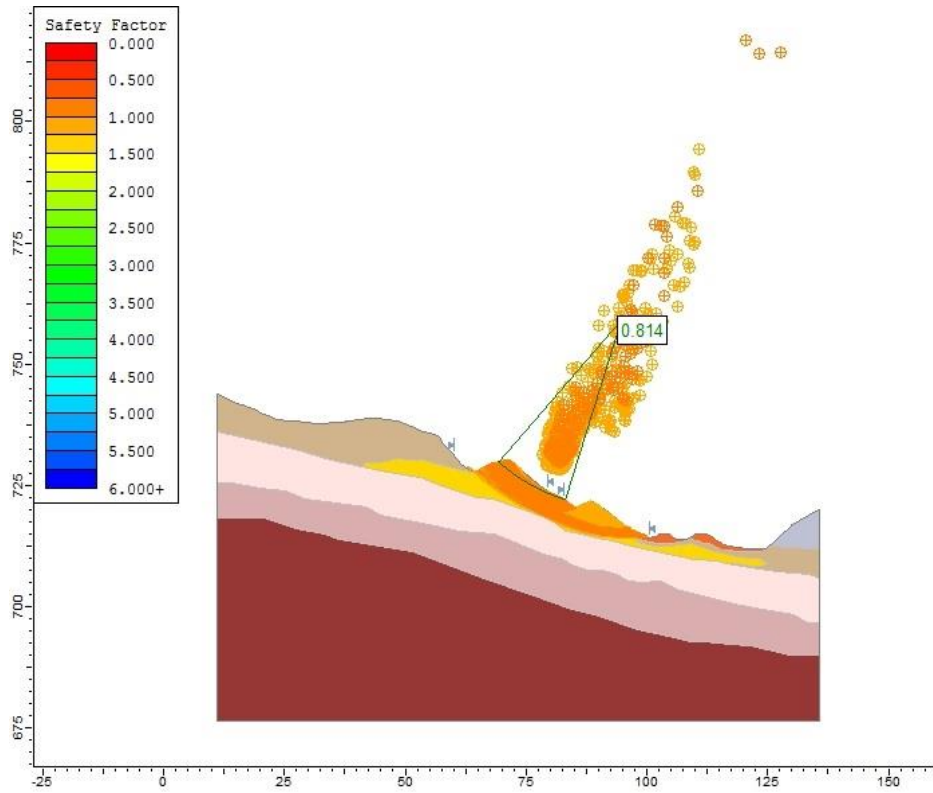


Figura 85. Análisis Local Estático Perfil A1-A1

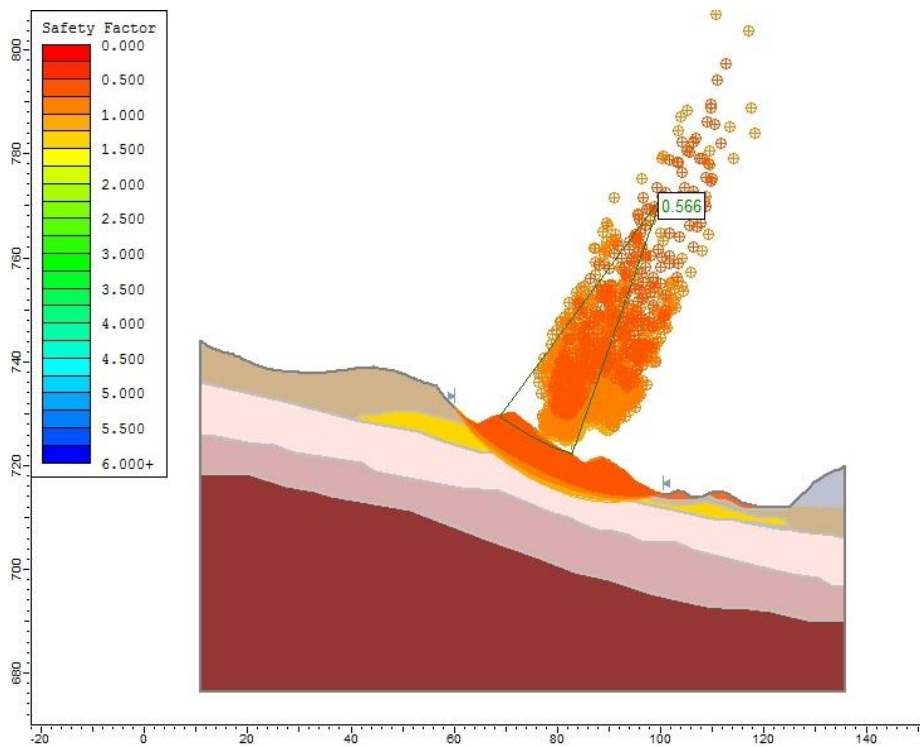


Figura 86. Análisis Local Pseudo-estático Perfil A1-A1.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

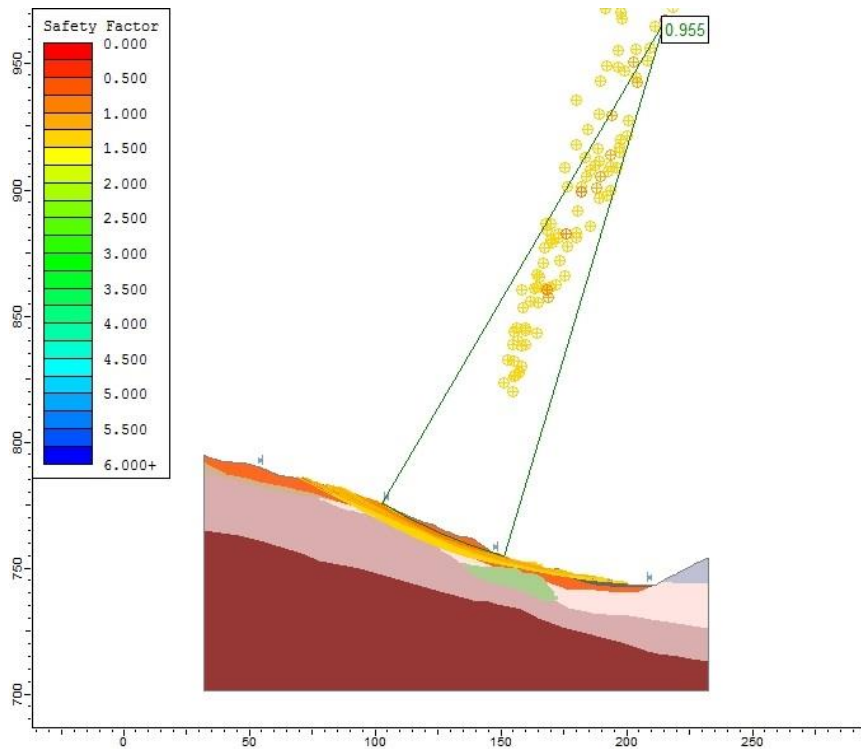


Figura 87. Análisis Global Estático Perfil A2-A2.

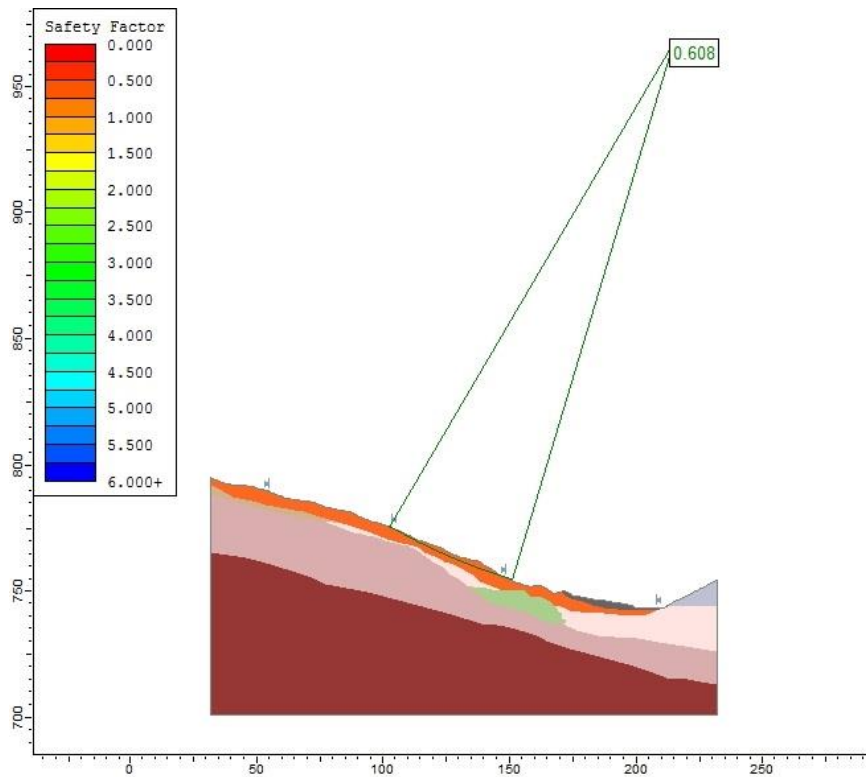


Figura 88. Análisis Global Pseudo-estático Perfil A2-A.

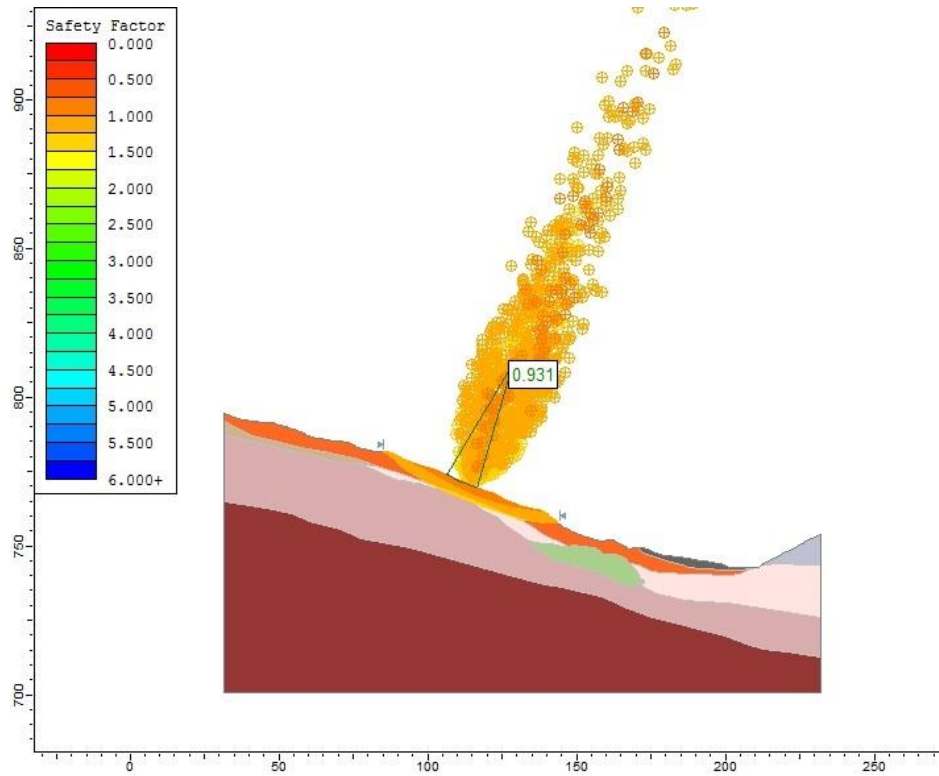


Figura 89. Análisis Local Estático Perfil A2-A2

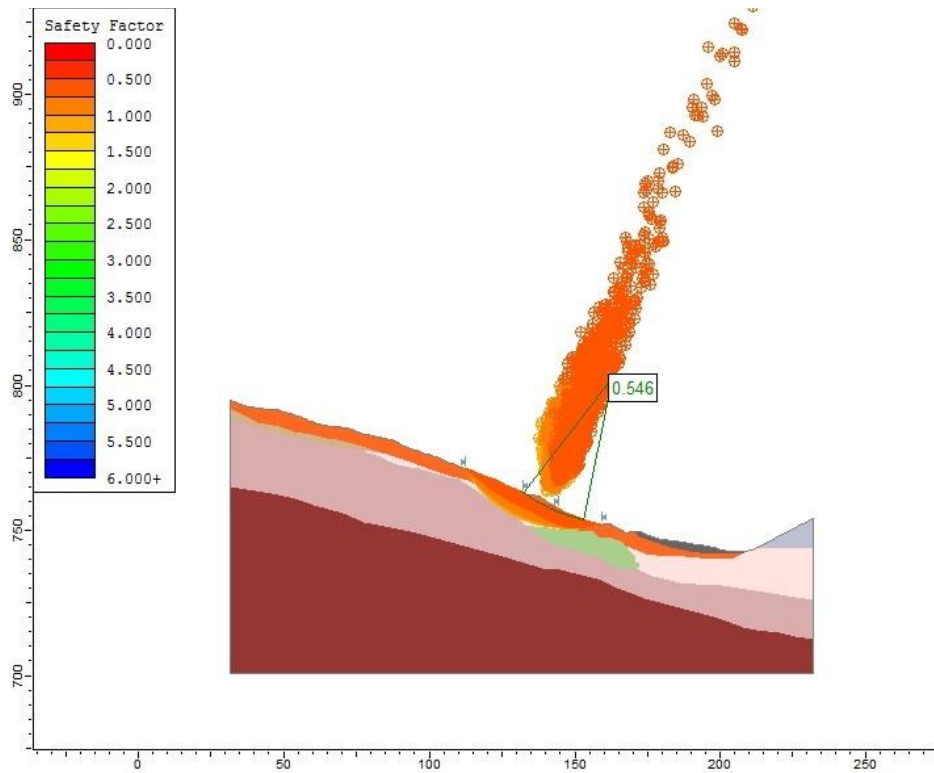


Figura 90. Análisis Local Pseudo-estático Perfil A2-A2.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

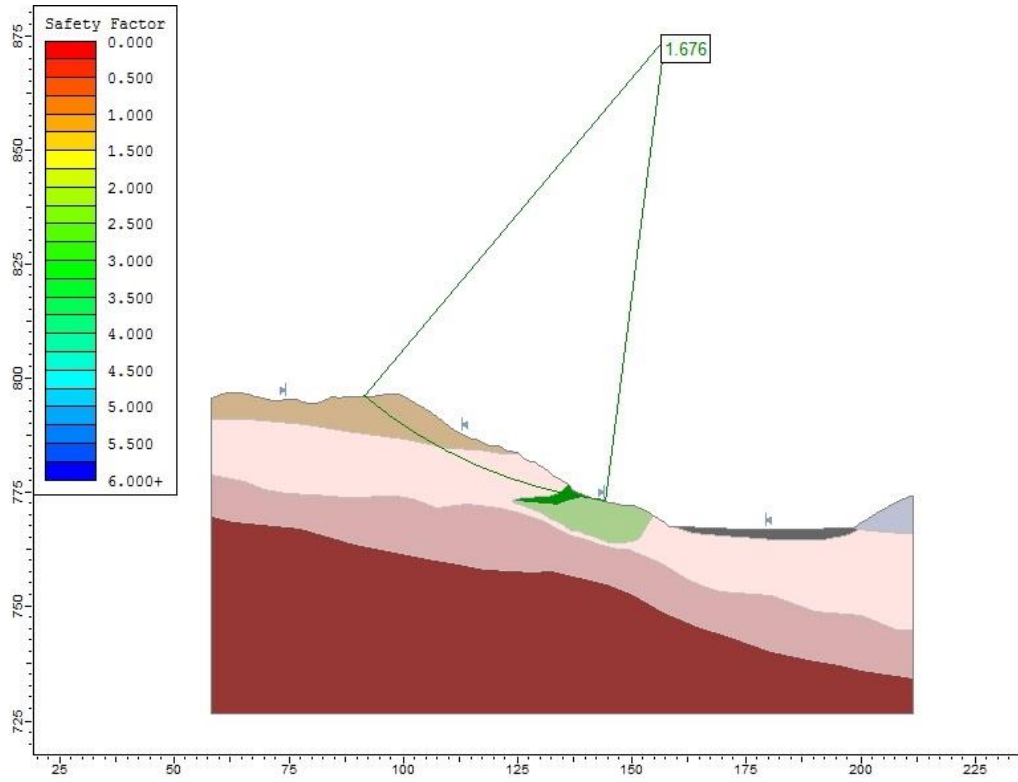


Figura 91. Análisis Global Estático Perfil A3-A3.

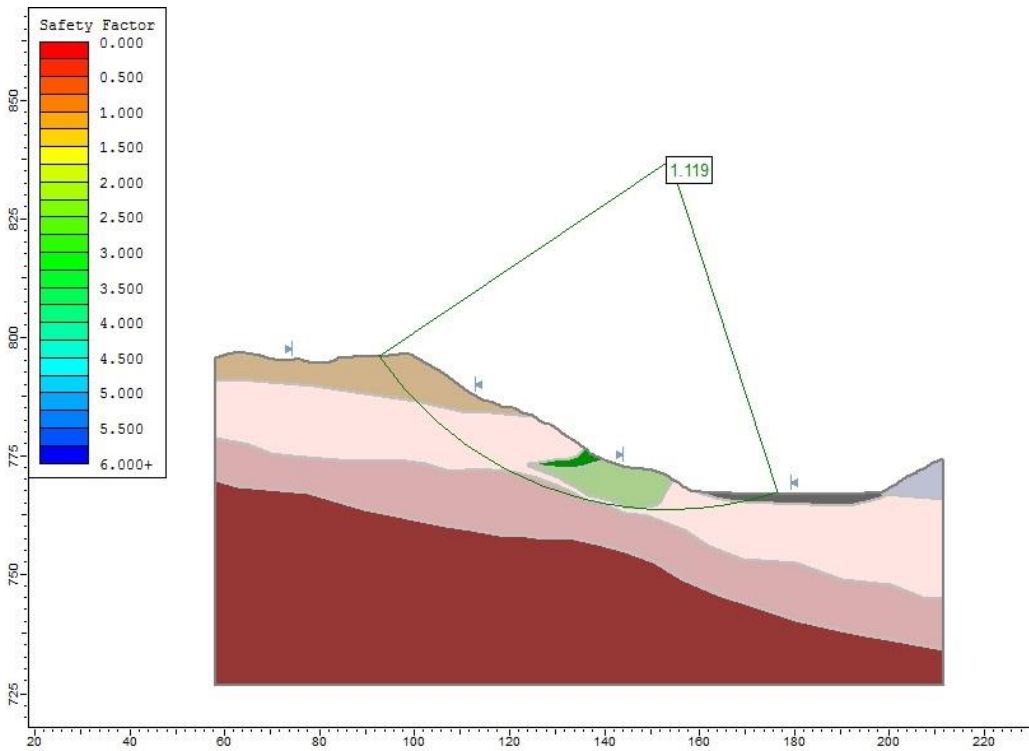


Figura 92. Análisis Global Pseudo-estático Perfil A3-A3.

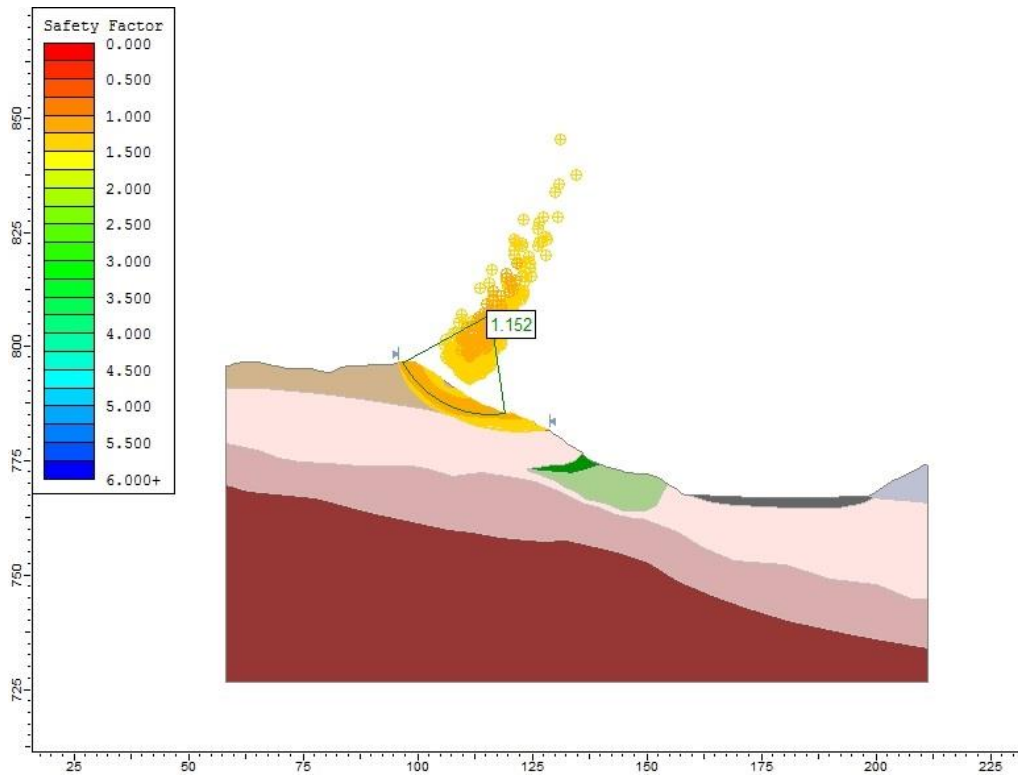


Figura 93. Análisis Local Estático Perfil A3-A3.

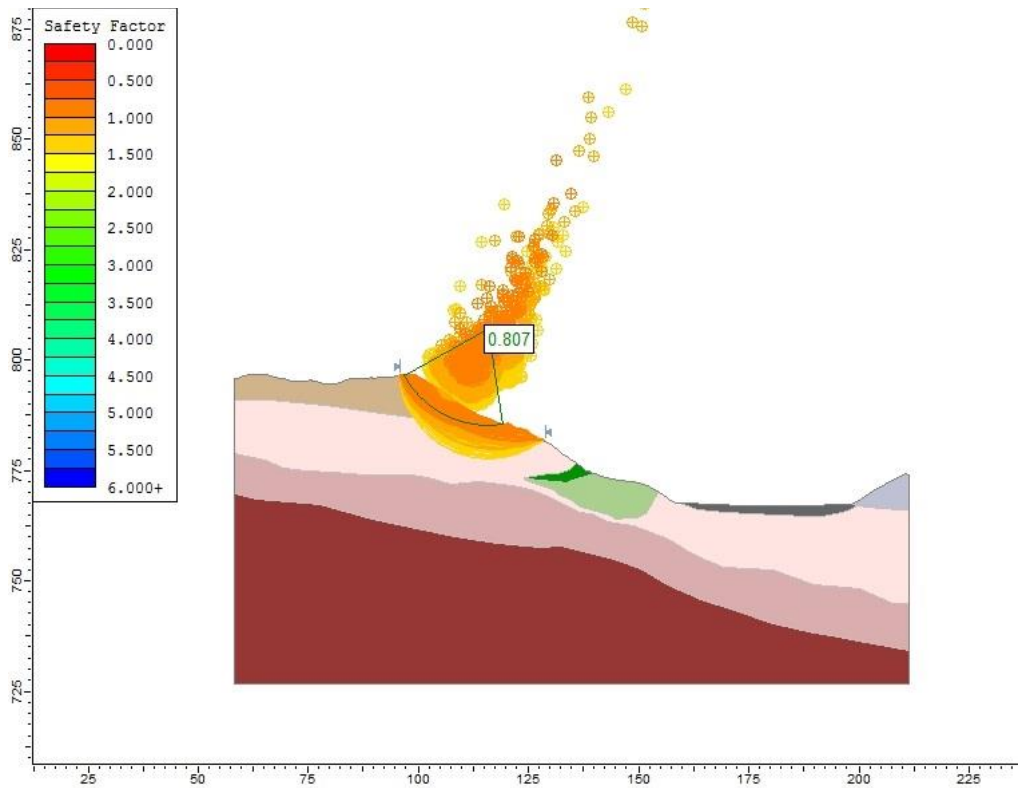


Figura 94. Análisis Local Pseudo-estático Perfil A3-A3.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

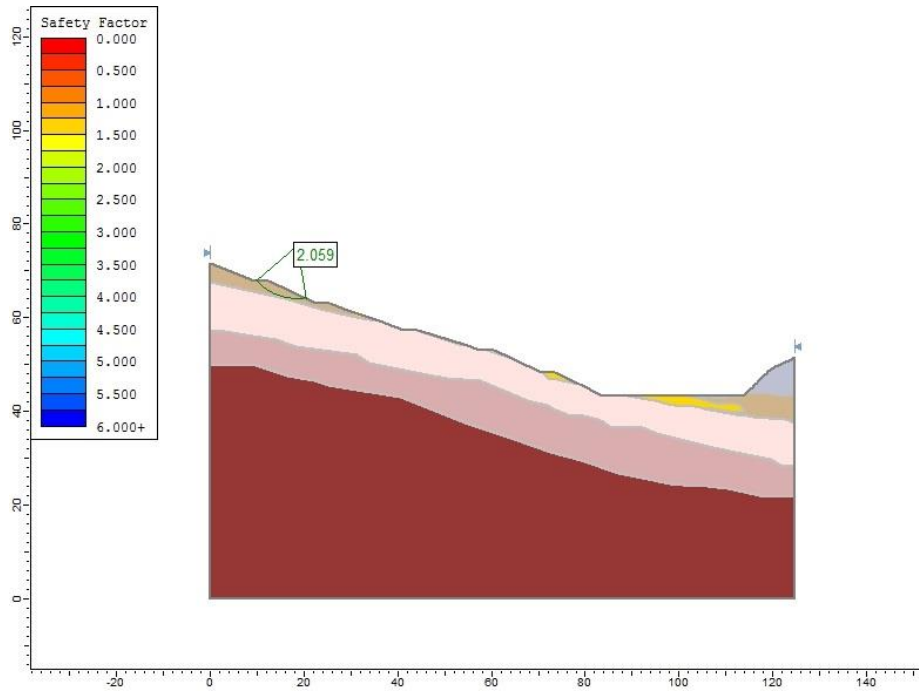


Figura 95. Análisis Global Estático para Solución Perfil A1-A1.

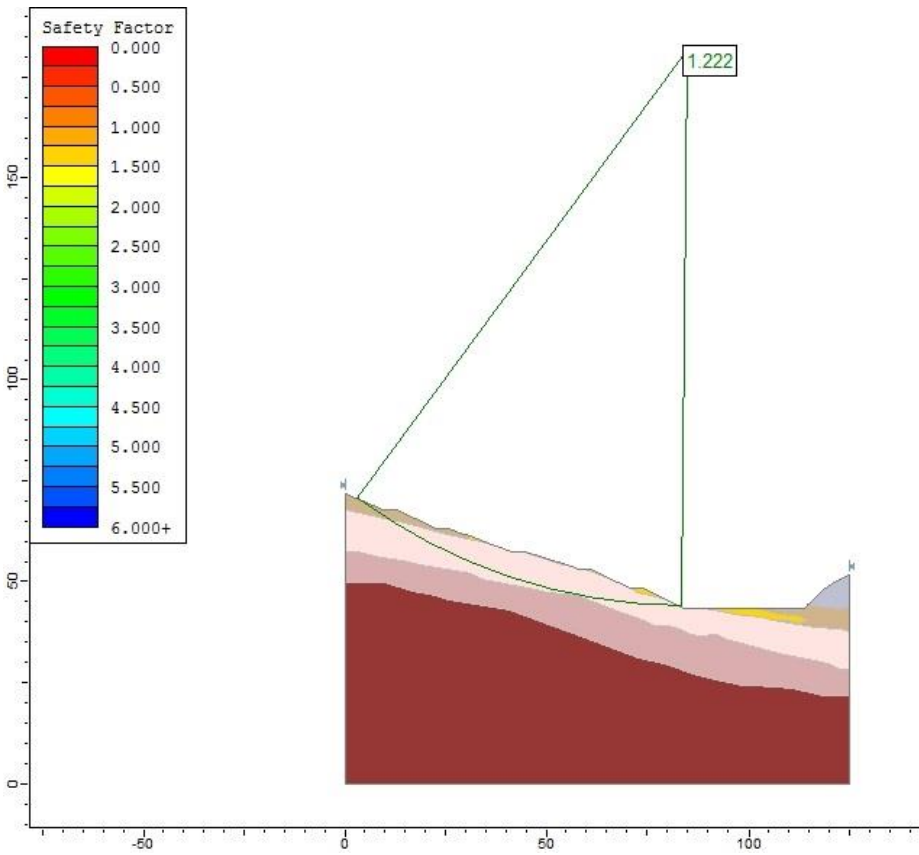


Figura 96. Análisis Global Pseudo-estático para Solución Perfil A1-A1.

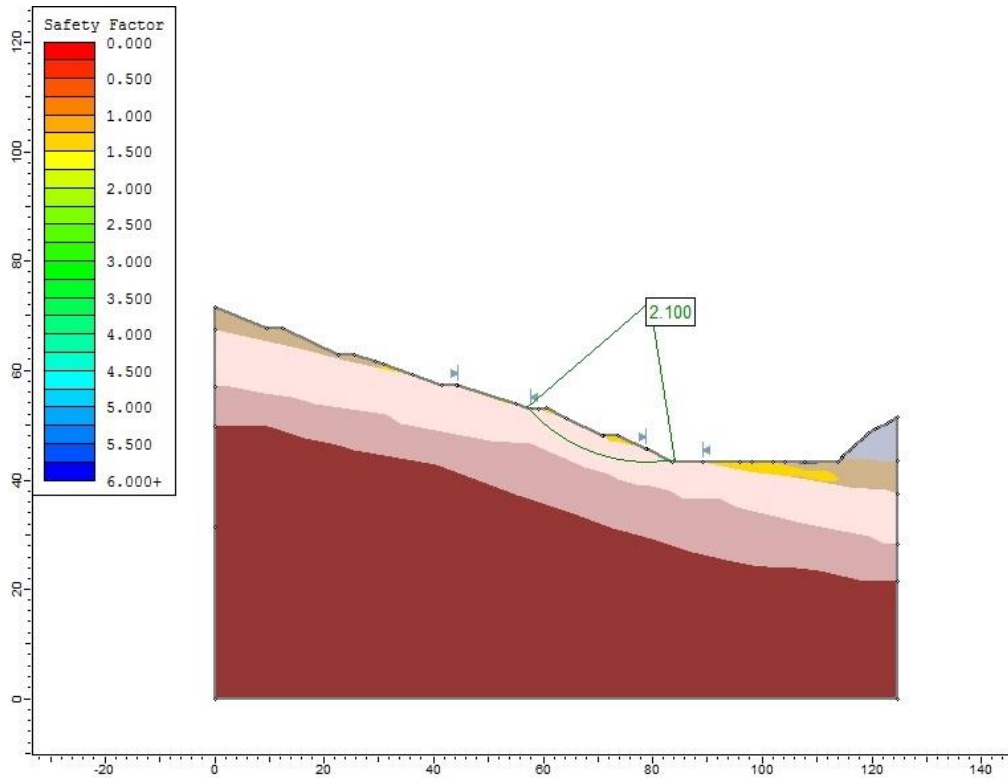


Figura 97. Análisis Local Estático para Solución Perfil A1-A1

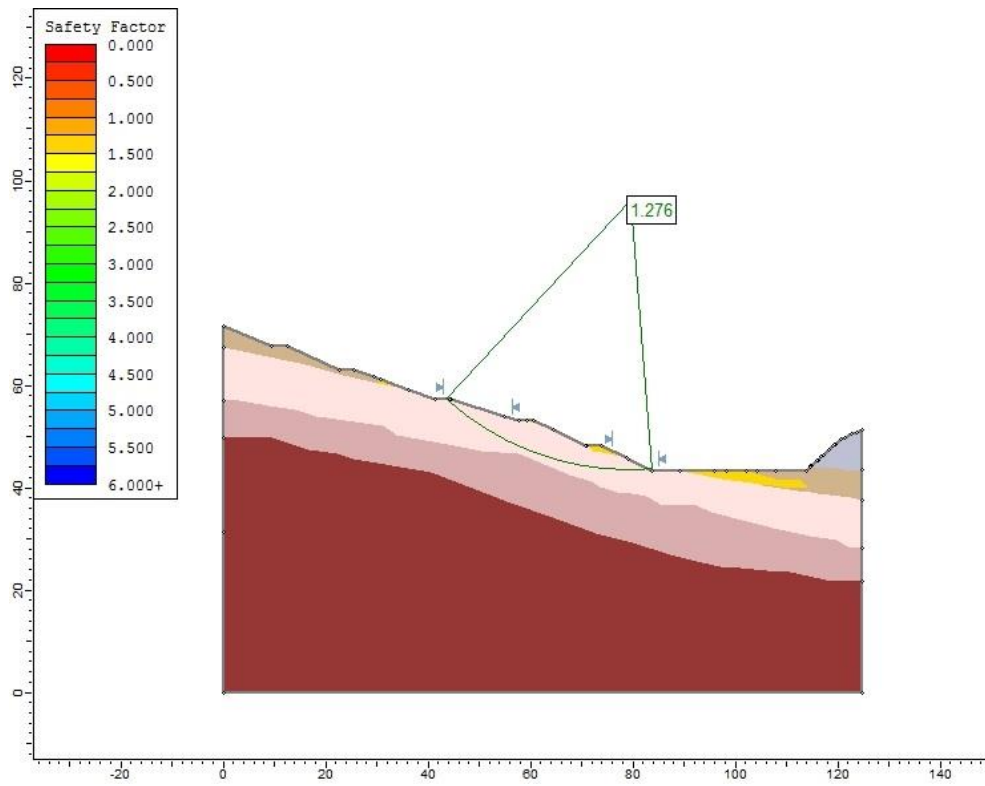


Figura 98. Análisis Local Pseudo-estático para Solución Perfil A1-A1.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

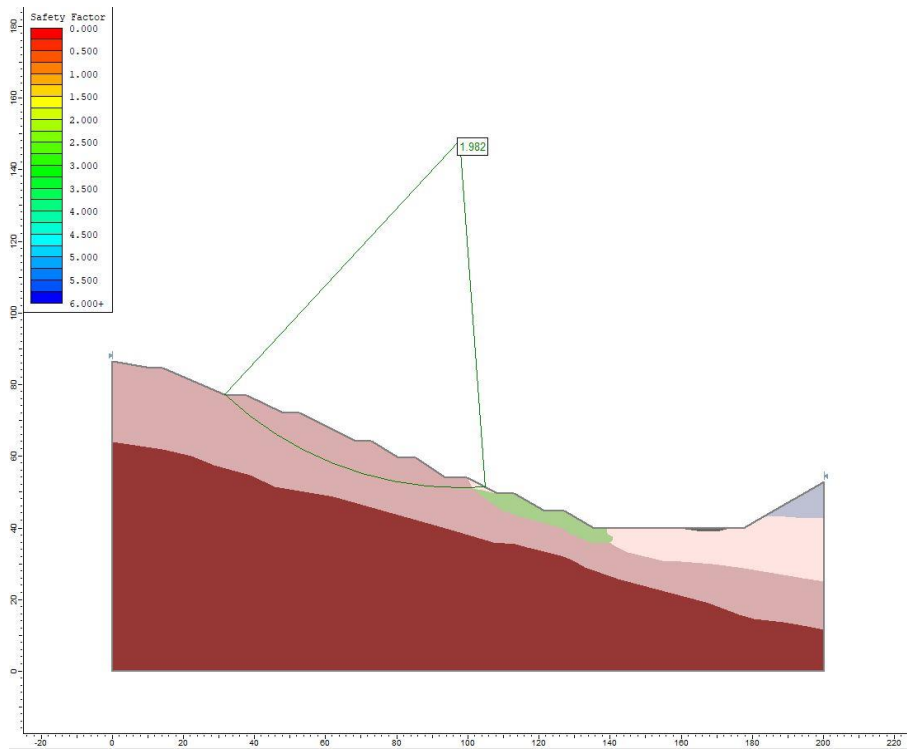


Figura 99. Análisis Global Estático para Solución Perfil A2-A2.

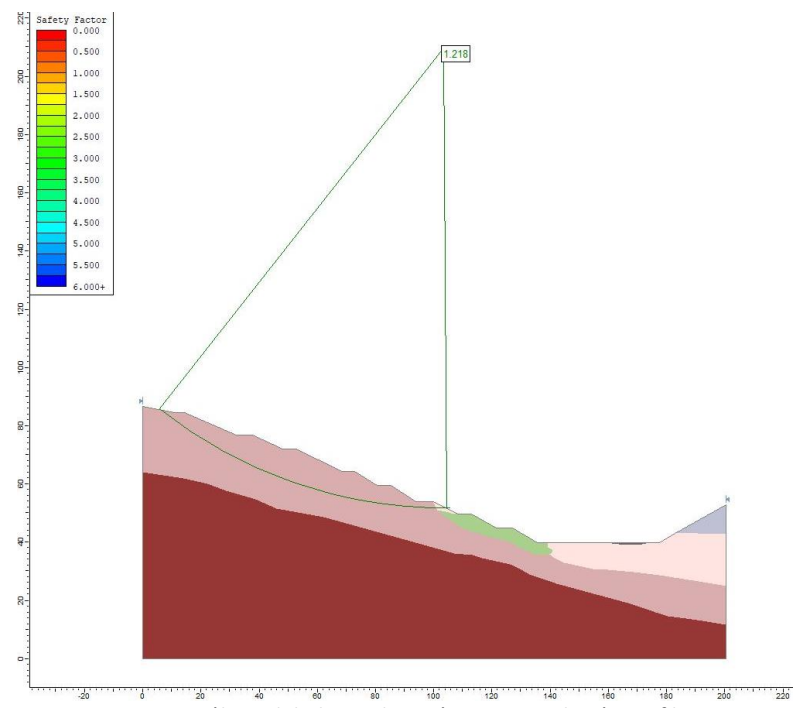


Figura 100. Análisis Global Pseudo-estático para Solución Perfil A2-A2.

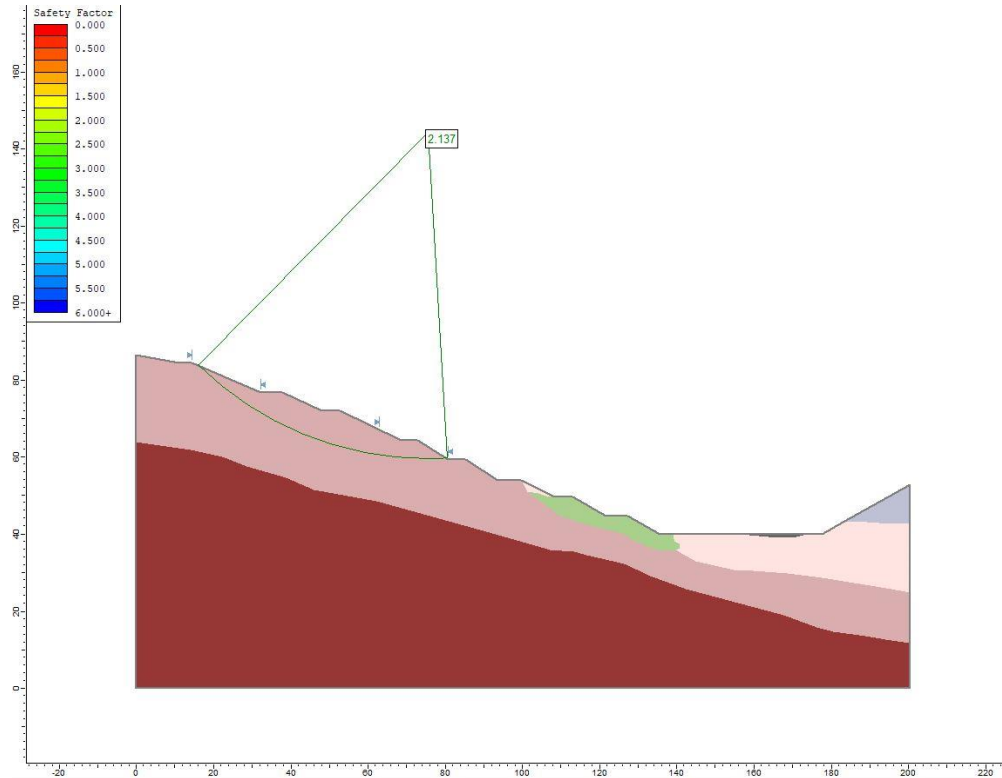


Figura 101. Análisis Local Estático para Solución Perfil A2-A2.

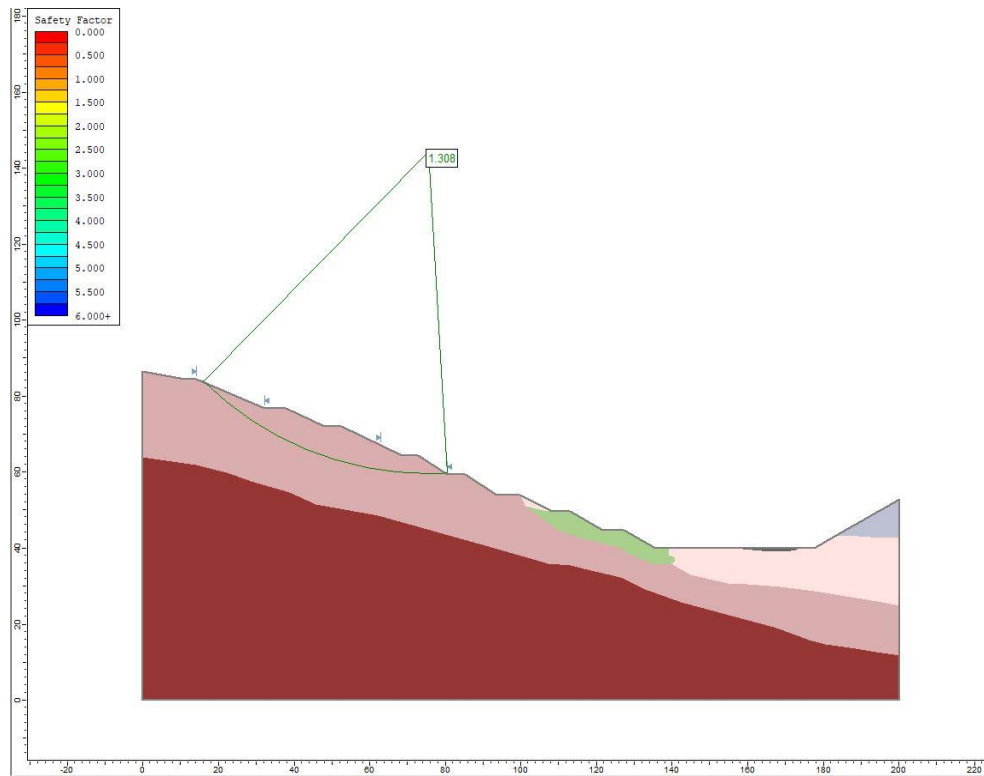


Figura 102. Análisis Local Pseudo-estático para solución Perfil A2-A2.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

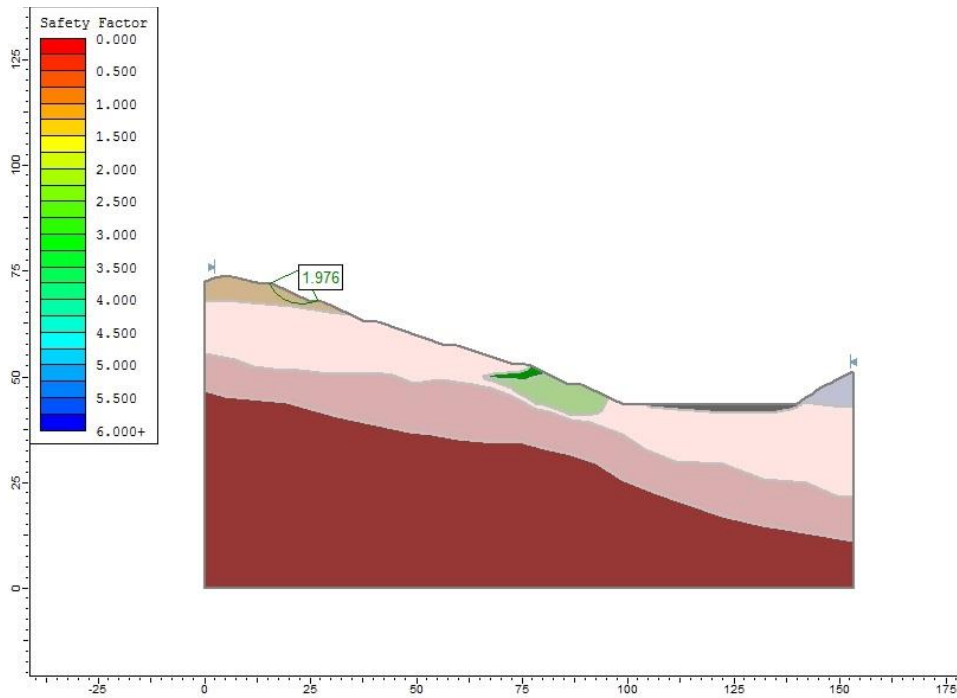


Figura 103. Análisis Global Estático para Solución Perfil A3-A3.

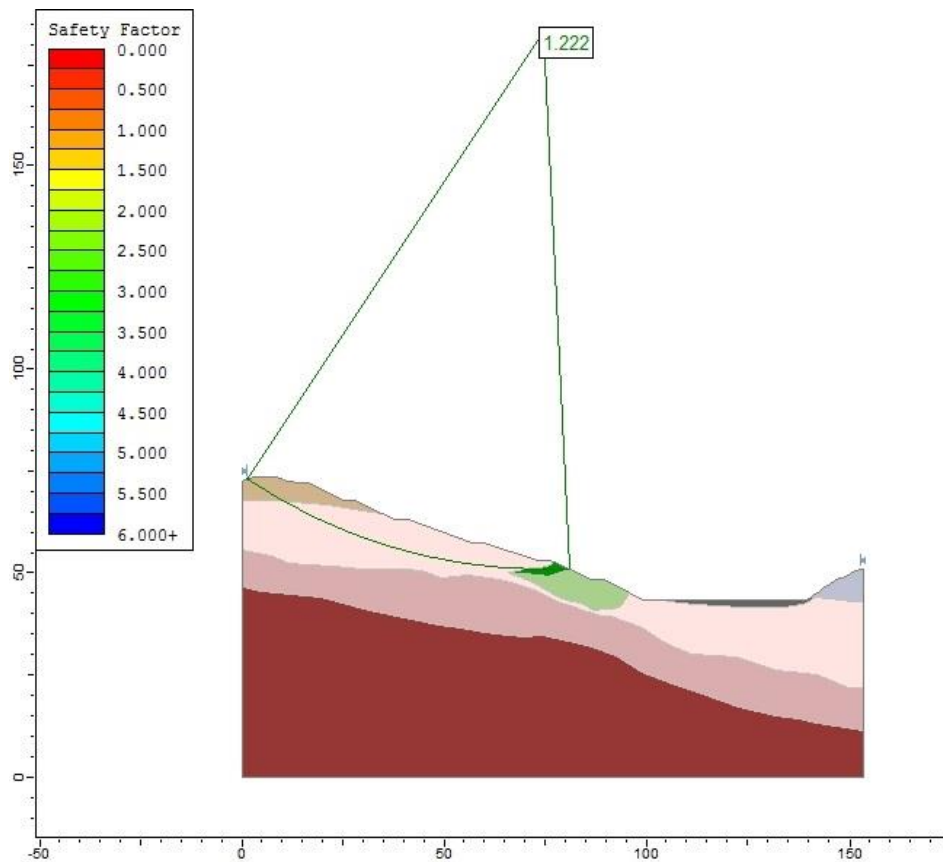


Figura 104. Análisis Global Pseudo-estático para Solución Perfil A3-A3.

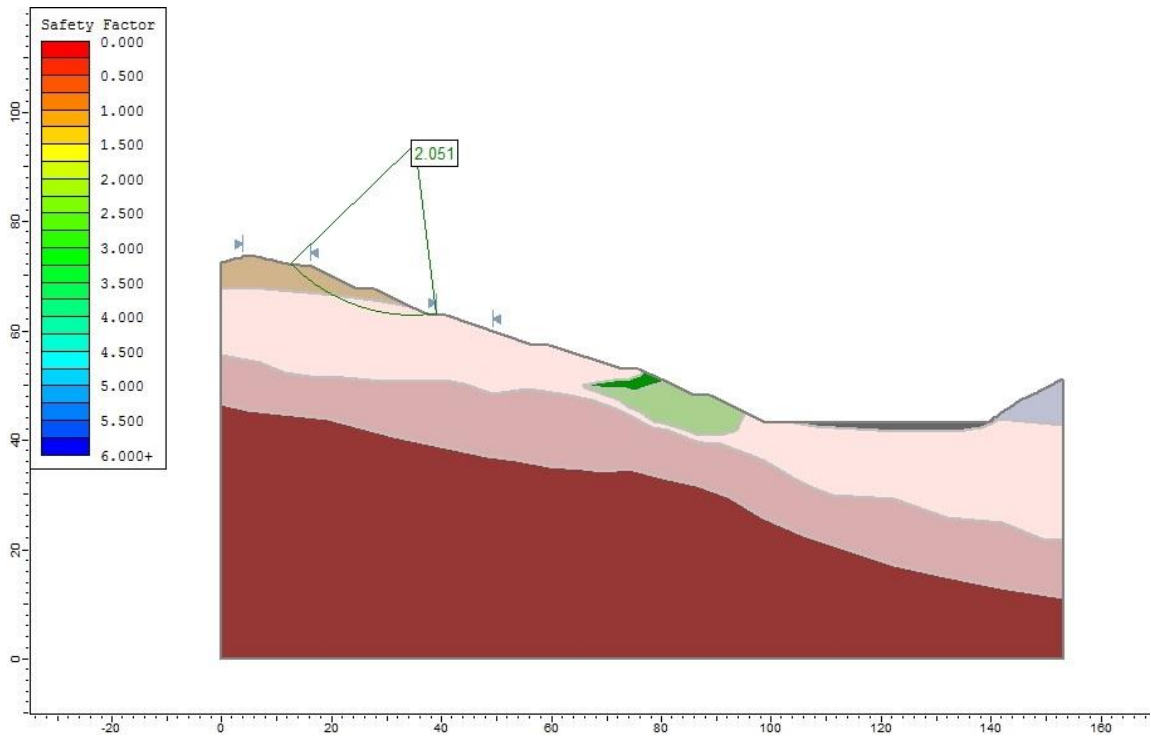


Figura 105. Análisis Local Estático para Solución Perfil A3-A3

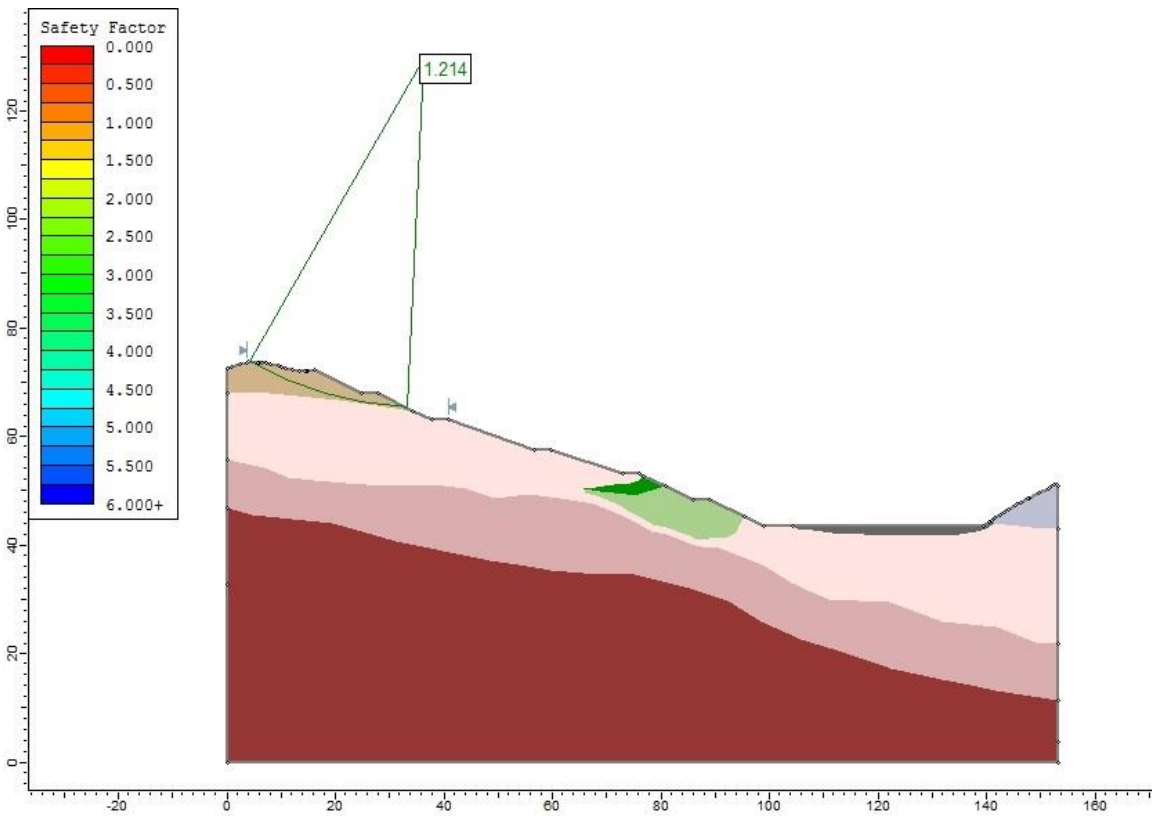


Figura 106. Análisis Local Pseudo-estático para solución Perfil A3-A3

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

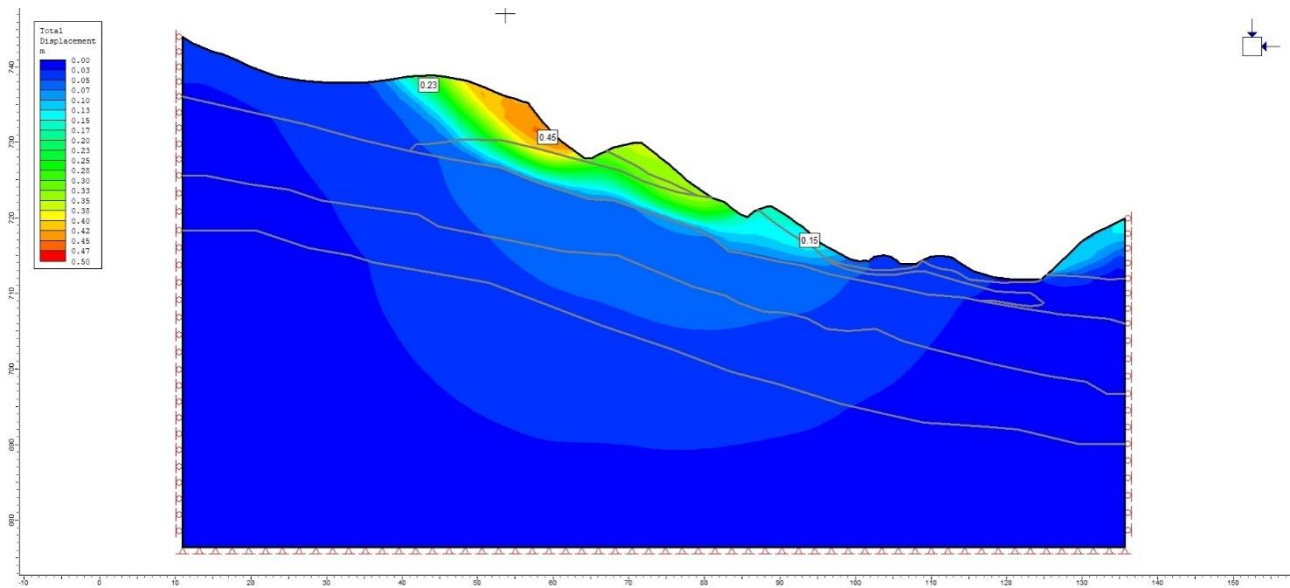


Figura 107. Deformaciones máximas condiciones naturales Perfil A1-A1 Análisis estático

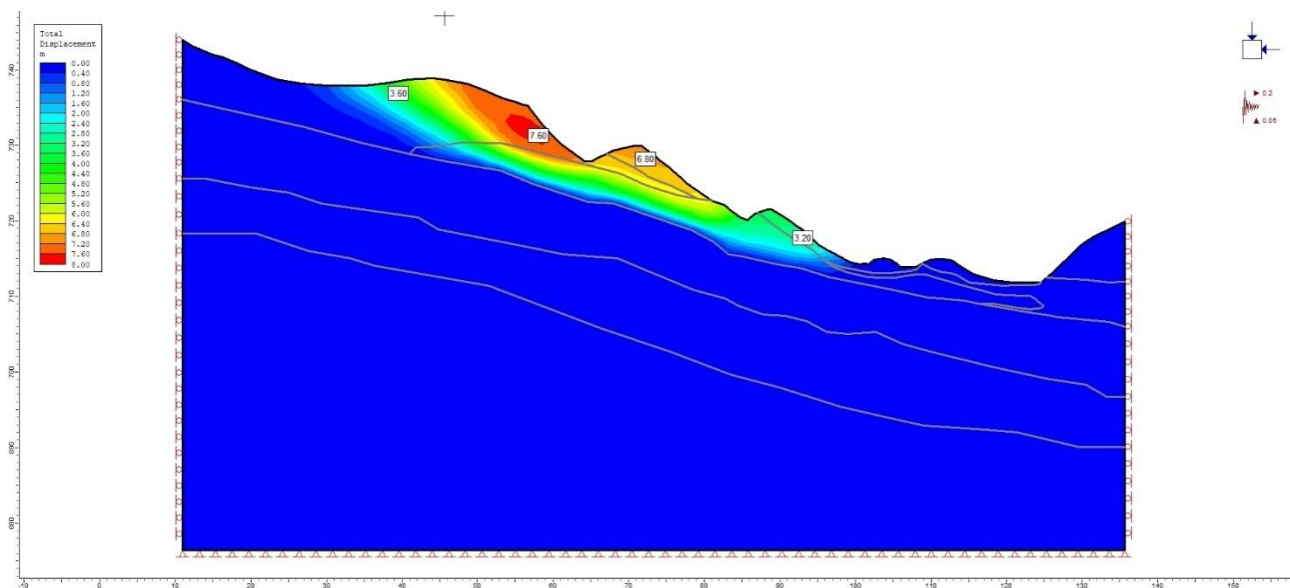


Figura 108. Deformaciones máximas condiciones naturales Perfil A1-A1 Análisis Pseudo-estático

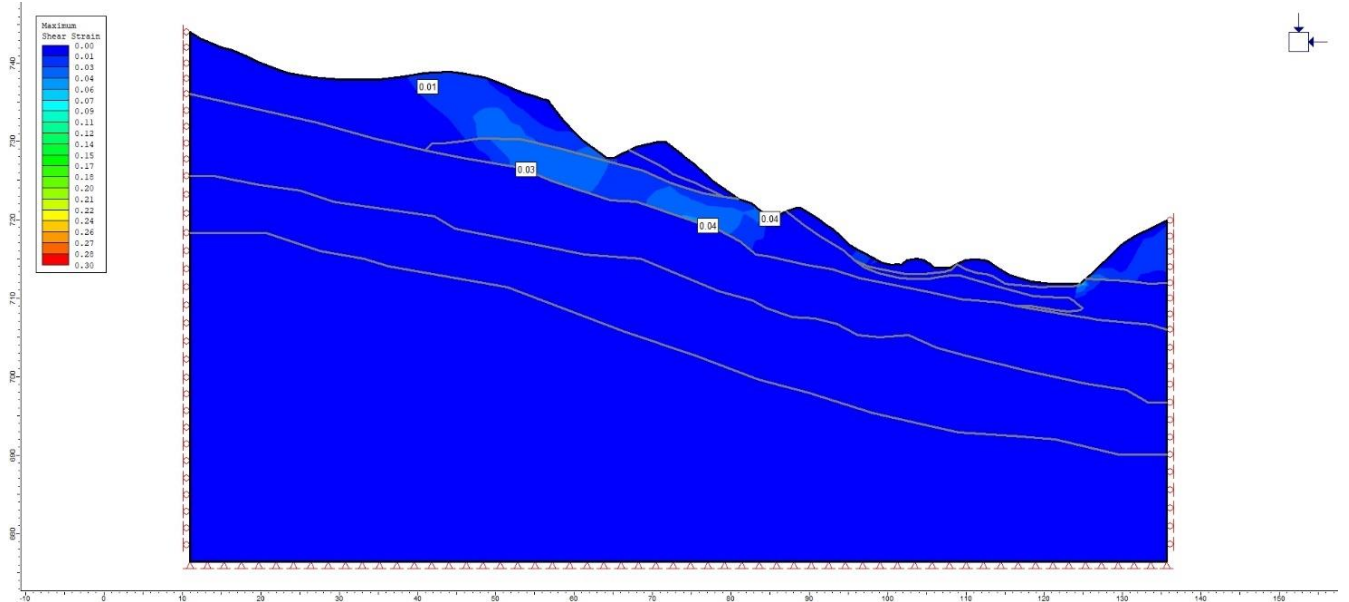


Figura 109. Esfuerzos máximos de cortante en condiciones naturales Perfil A1-A1 Análisis estático.

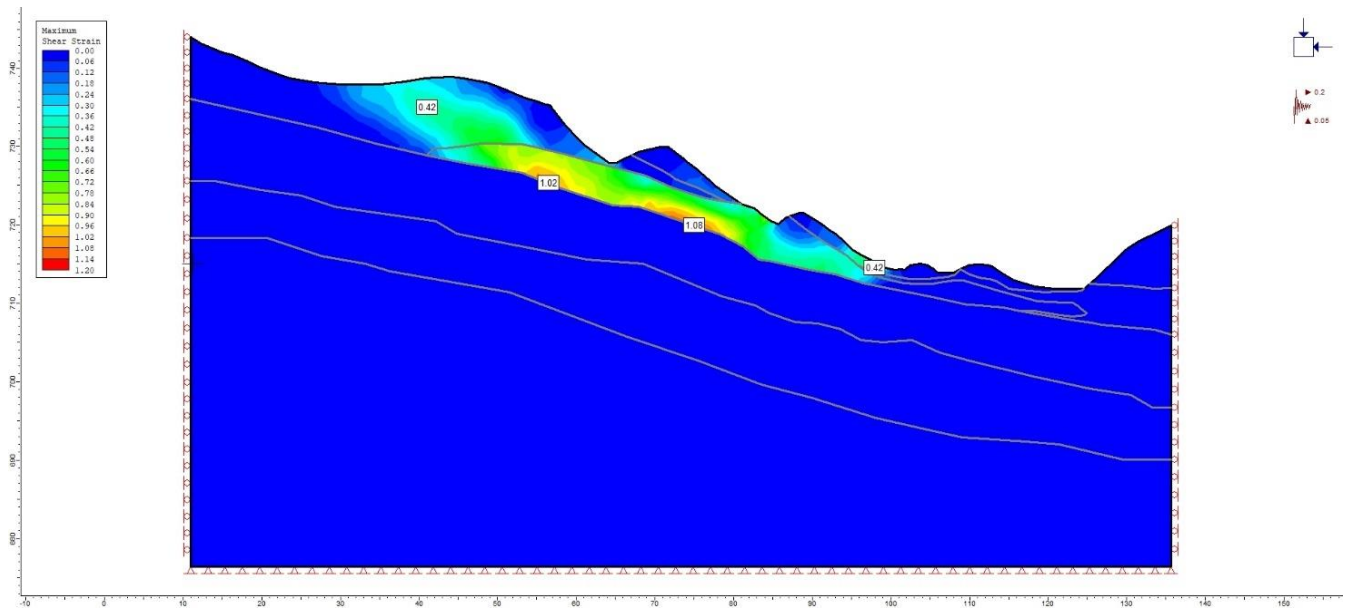


Figura 110. Esfuerzos máximos de cortante en condiciones naturales Perfil A1-A1 Análisis Pseudo-estático.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

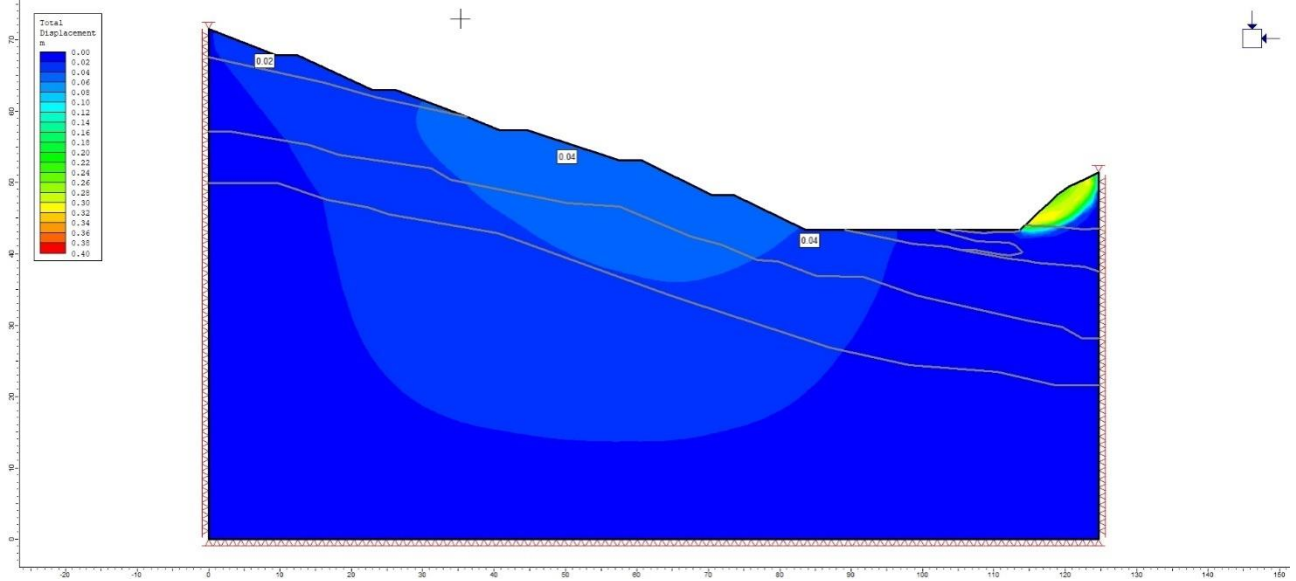


Figura 111. Deformaciones máximas condiciones solución 1 Perfil A1-A1 Análisis estático

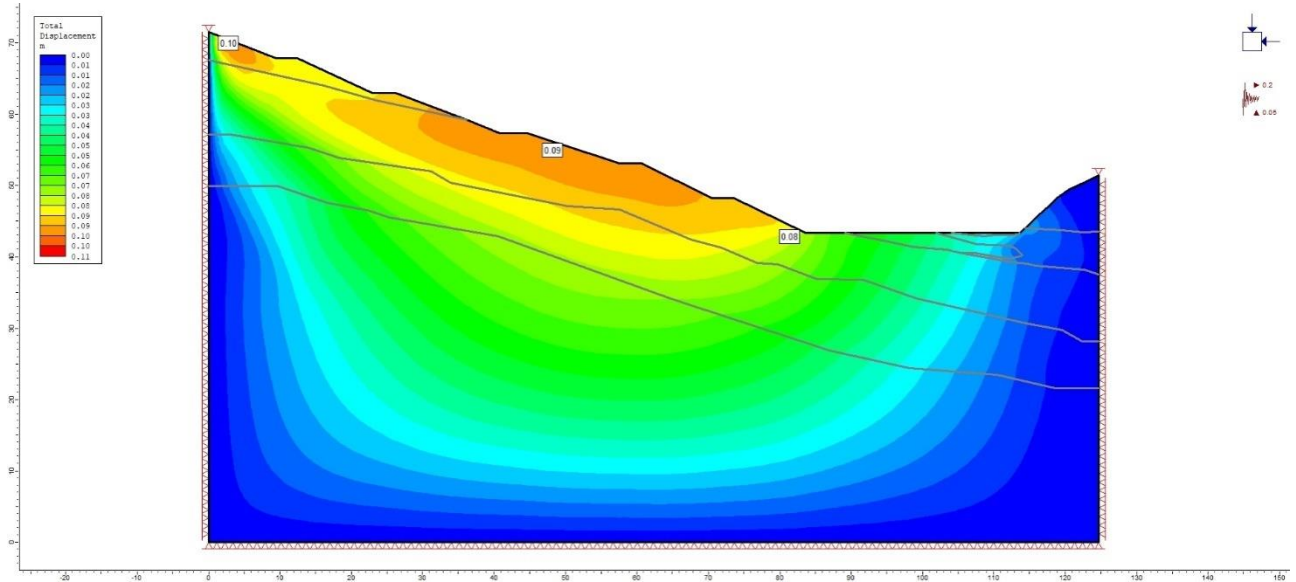


Figura 112. Deformaciones máximas condiciones solución 1 Perfil A1-A1 Análisis Pseudo-estático

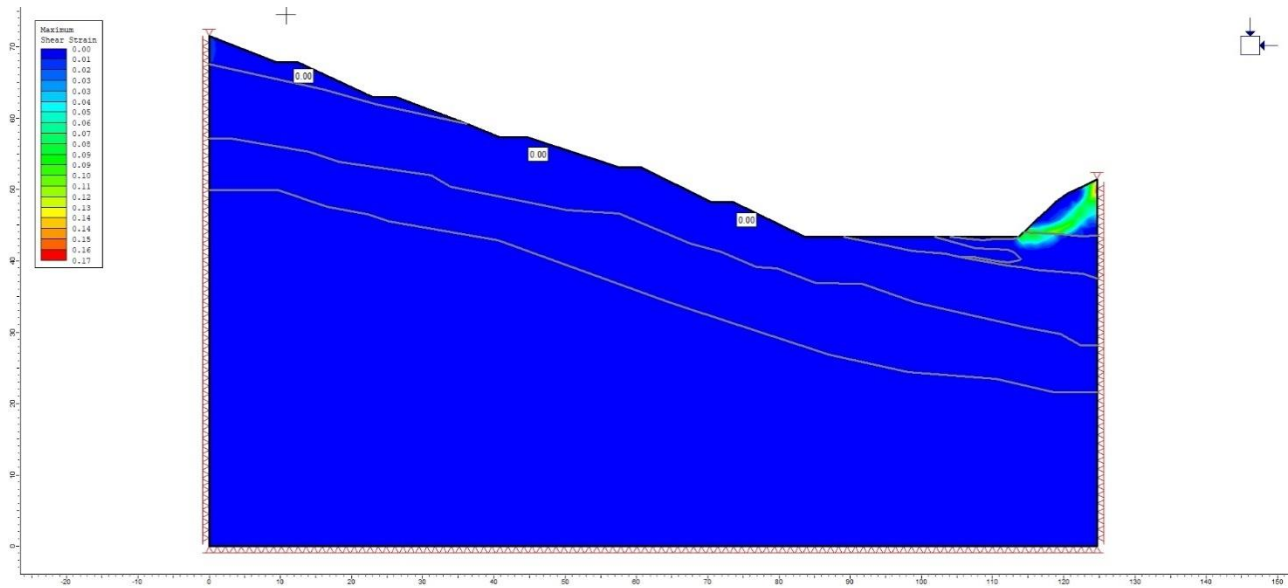


Figura 113. Esfuerzos máximos de cortante para solución 1 Perfil A1-A1 Análisis estático.

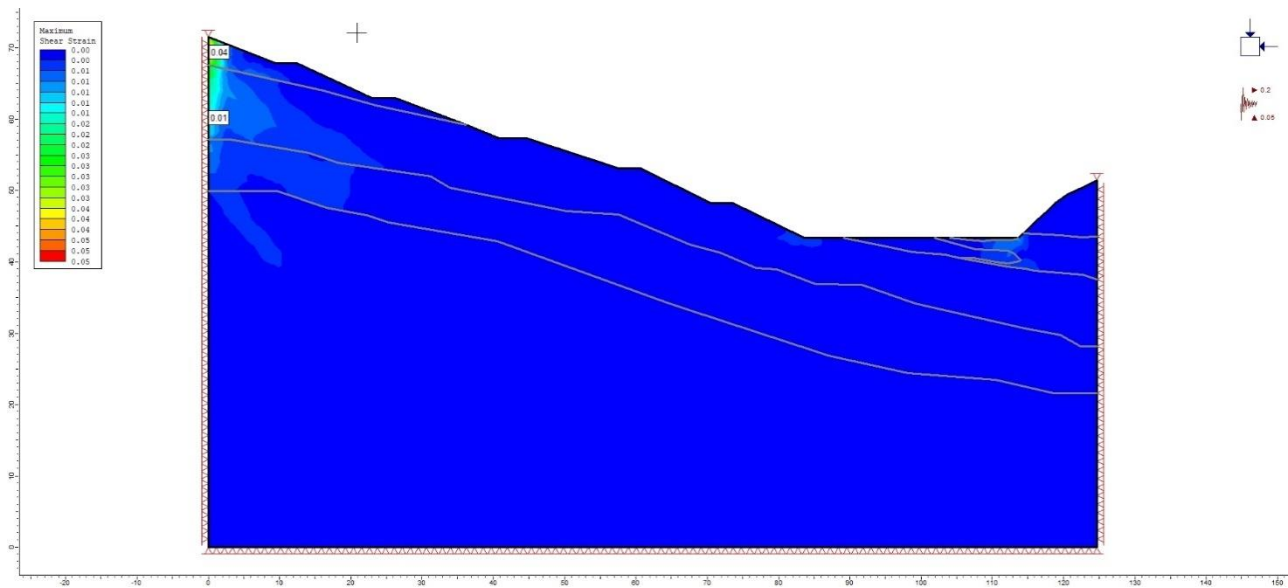


Figura 114. Esfuerzos máximos de cortante para solución 1 Perfil A1-A1 Análisis Pseudo-estático.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

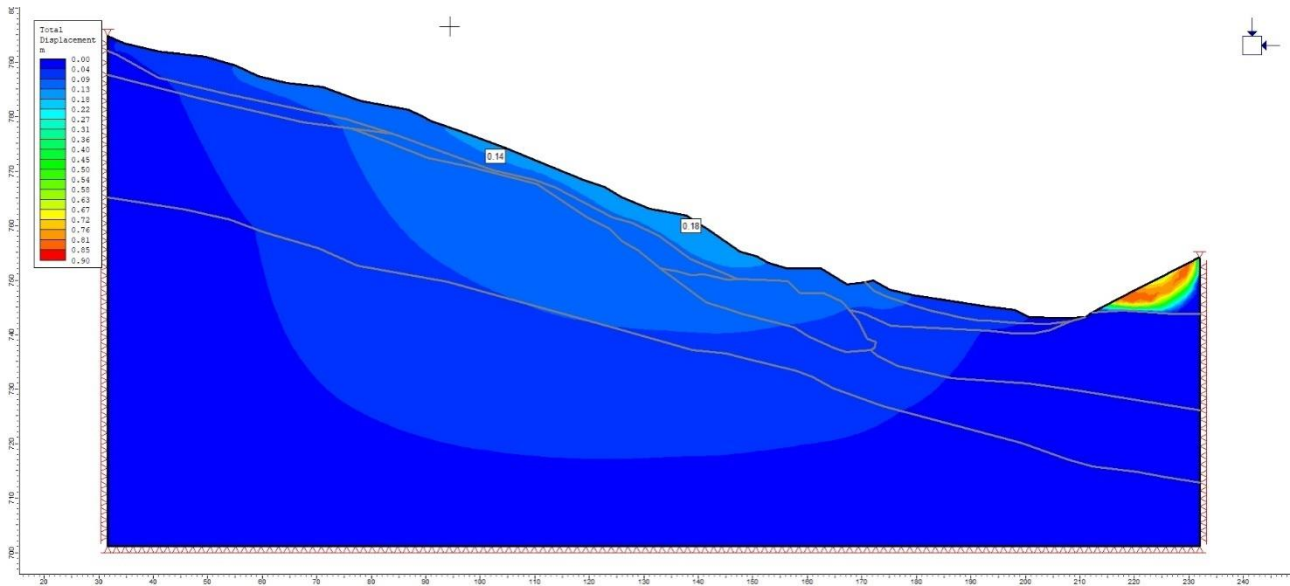


Figura 115. Deformaciones máximas condiciones naturales Perfil A2-A2 Análisis estático

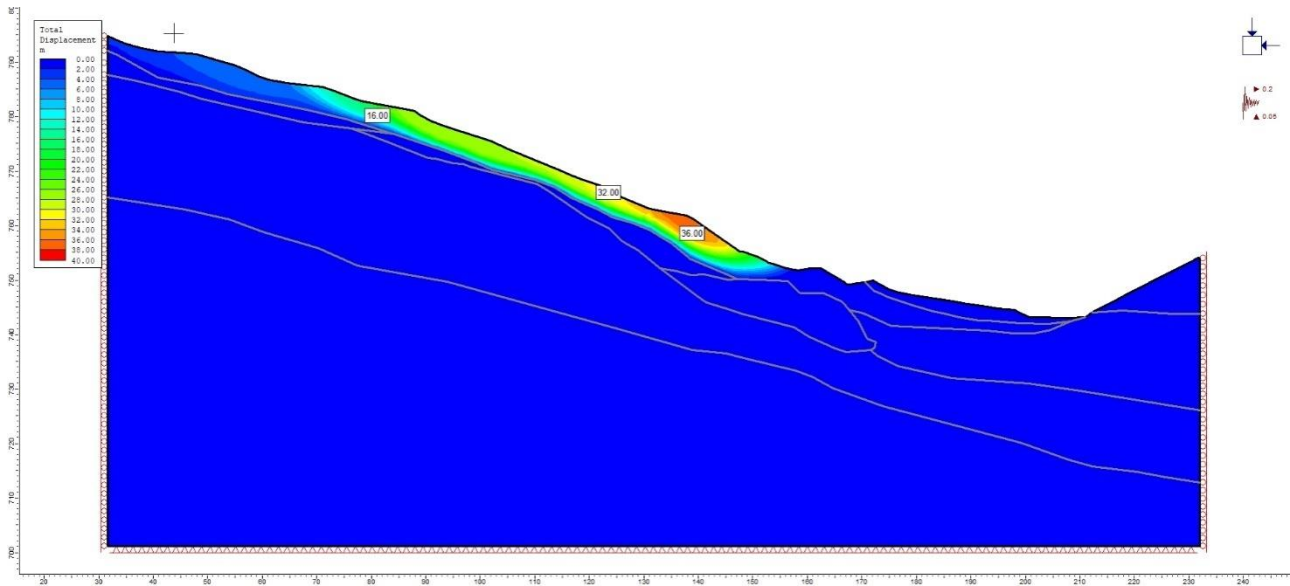


Figura 116. Deformaciones máximas condiciones naturales Perfil A2-A2 Análisis Pseudo-estático

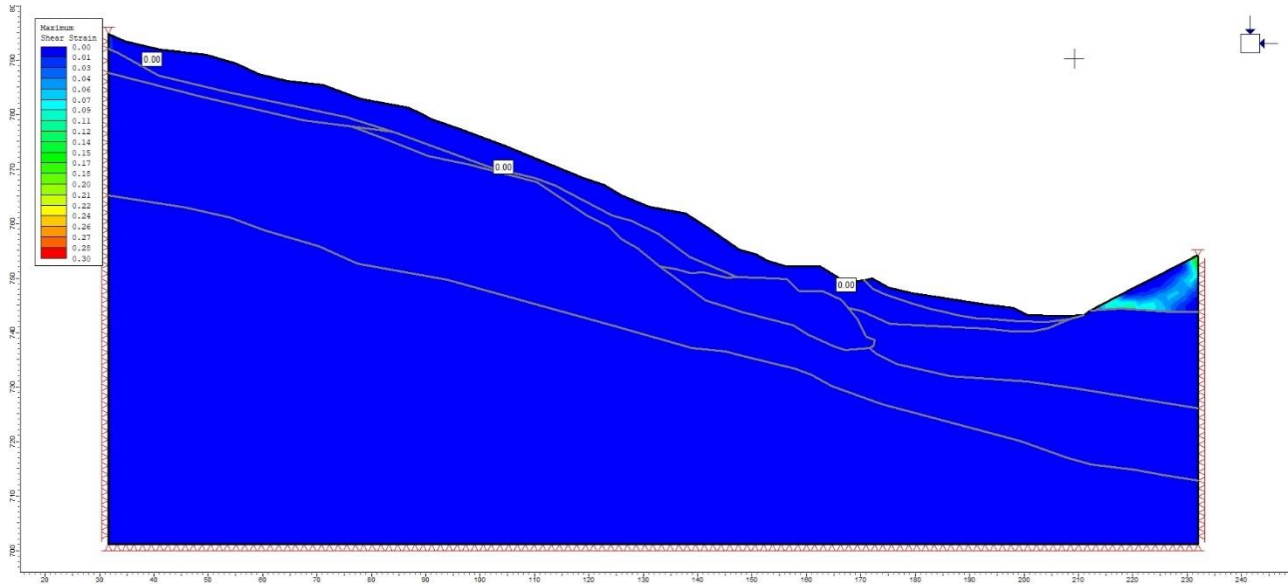


Figura 117. Esfuerzos máximos de cortante en condiciones naturales Perfil A2-A2 Análisis estático.

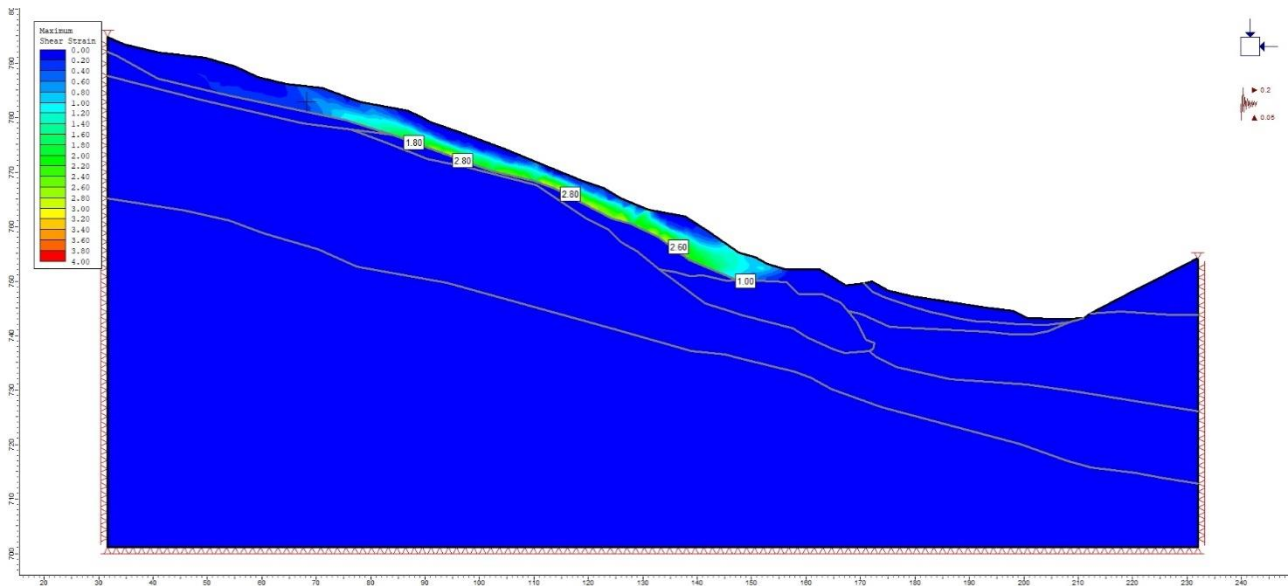


Figura 118. Esfuerzos máximos de cortante en condiciones naturales Perfil A2-A2 Análisis Pseudo-estático.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

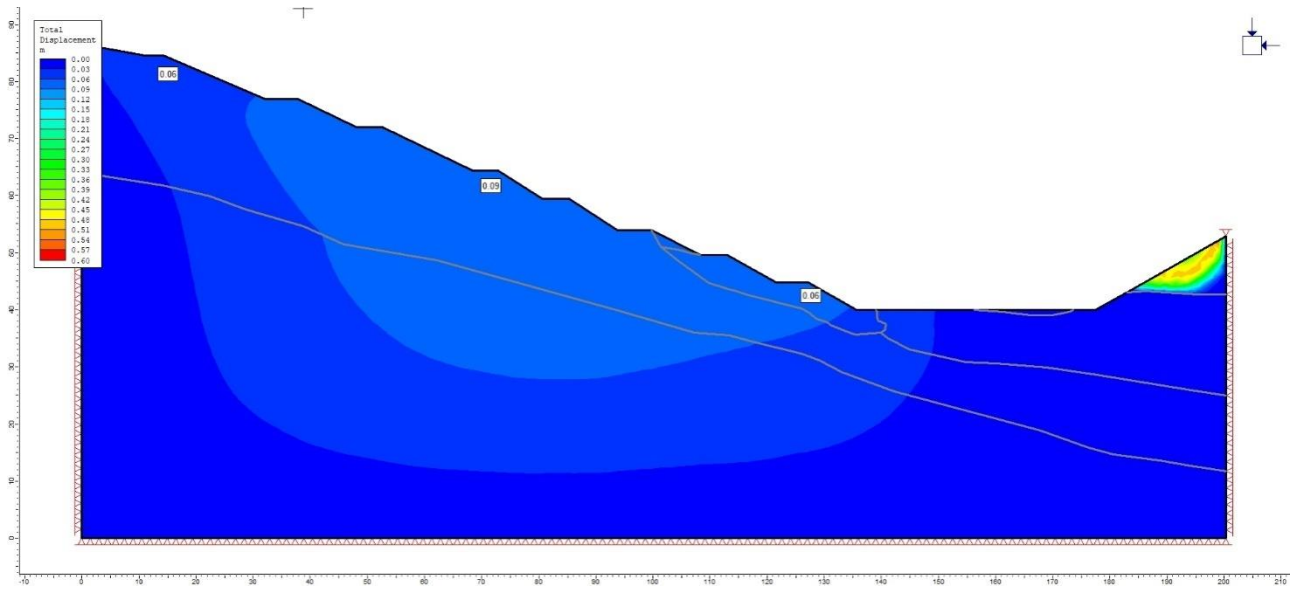


Figura 119. Deformaciones máximas condiciones solución Perfil A2-A2 Análisis estático

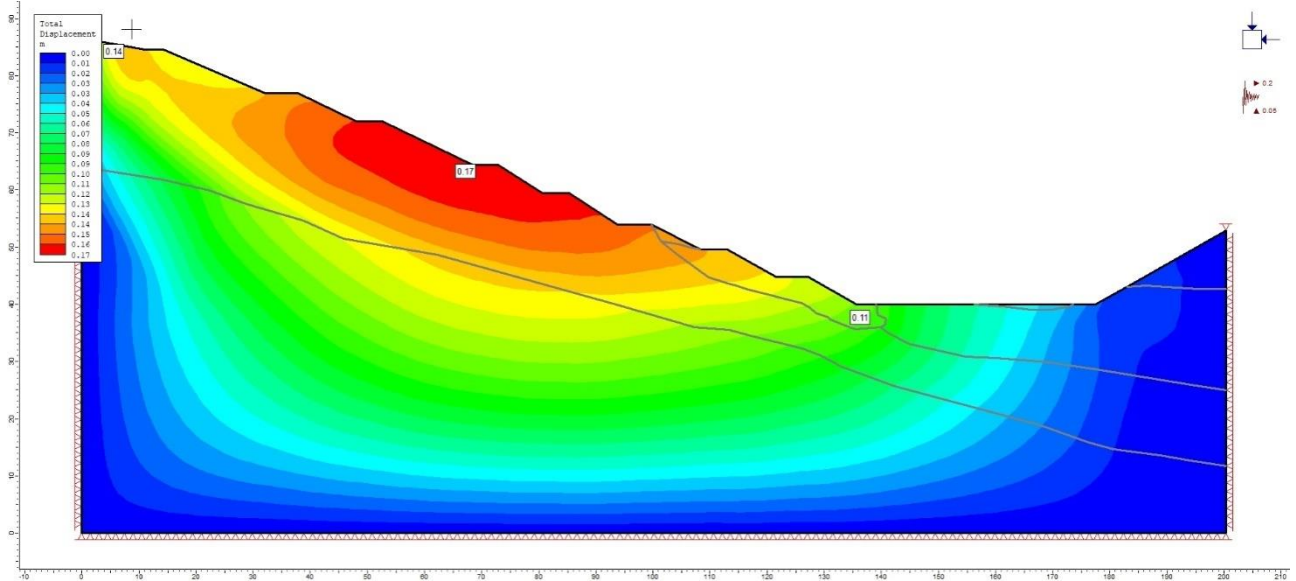


Figura 120. Deformaciones máximas condiciones solución Perfil A2-A2 Análisis Pseudo-estático

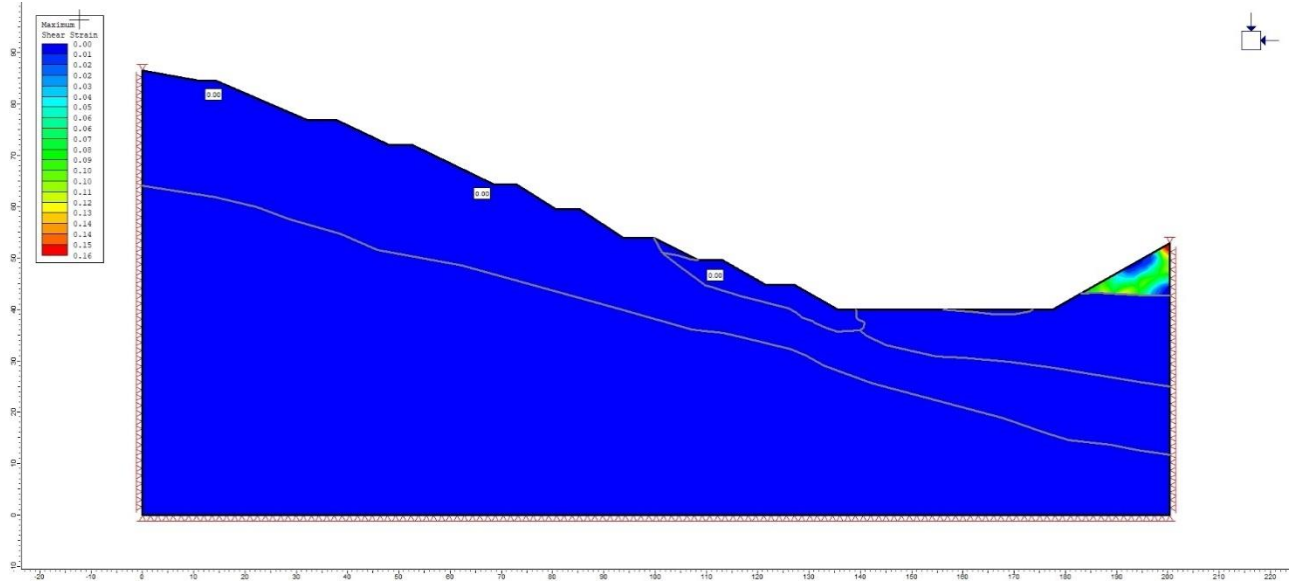


Figura 121. Esfuerzos máximos de cortante para solución 1 Perfil A2-A2 Análisis estático.

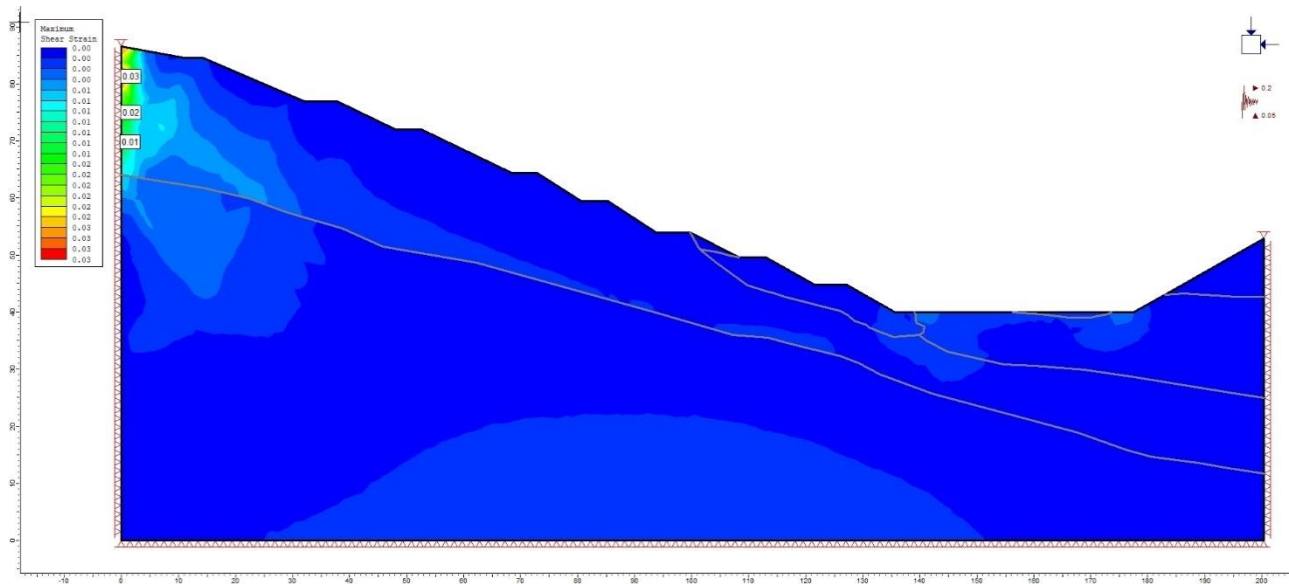


Figura 122. Esfuerzos máximos de cortante para solución 1 Perfil A2-A2 Análisis Pseudo-estático.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

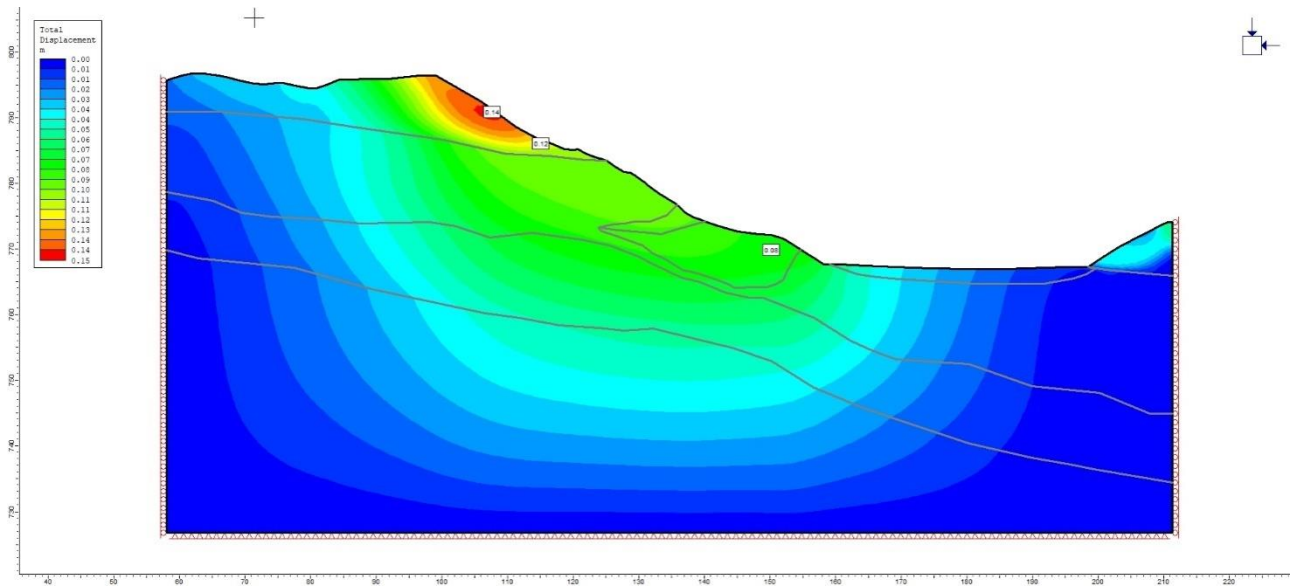


Figura 123. Deformaciones máximas condiciones naturales Perfil A3-A3 Análisis estático

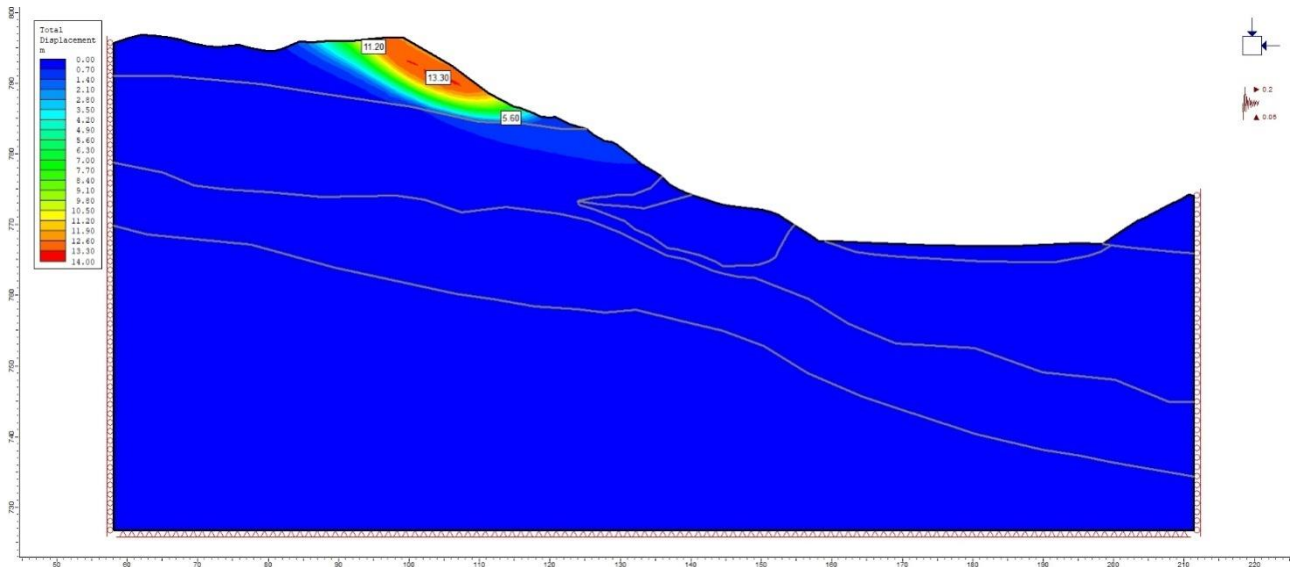


Figura 124. Deformaciones máximas condiciones naturales Perfil A3-A3 Análisis Pseudo-estático

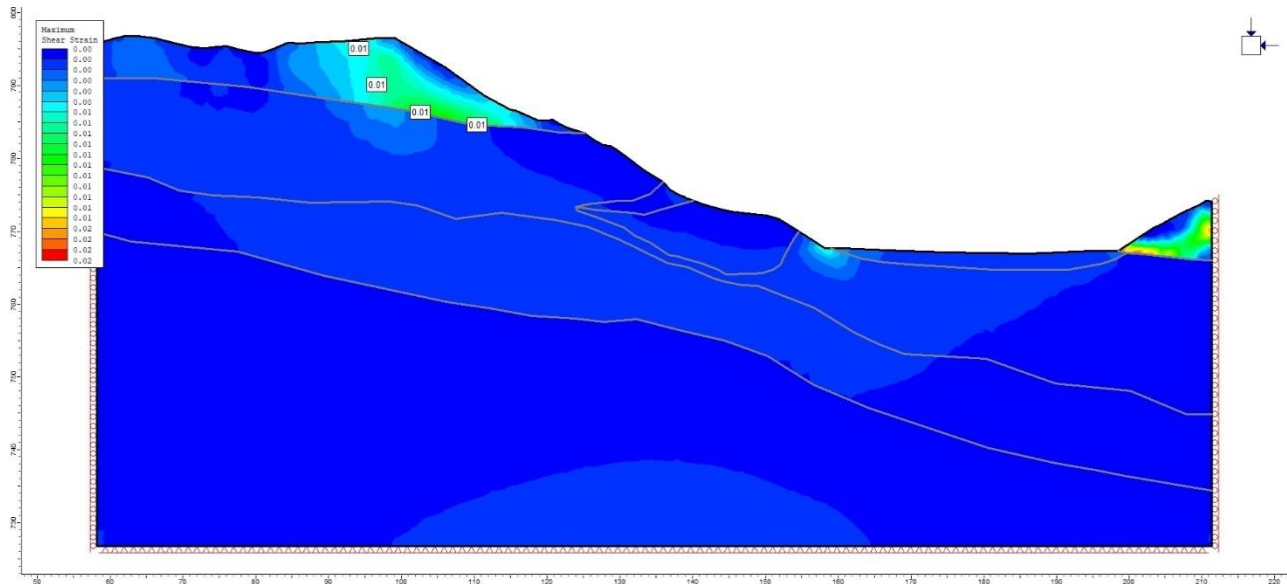


Figura 125. Esfuerzos máximos de cortante en condiciones naturales Perfil A3-A3 Análisis estático.

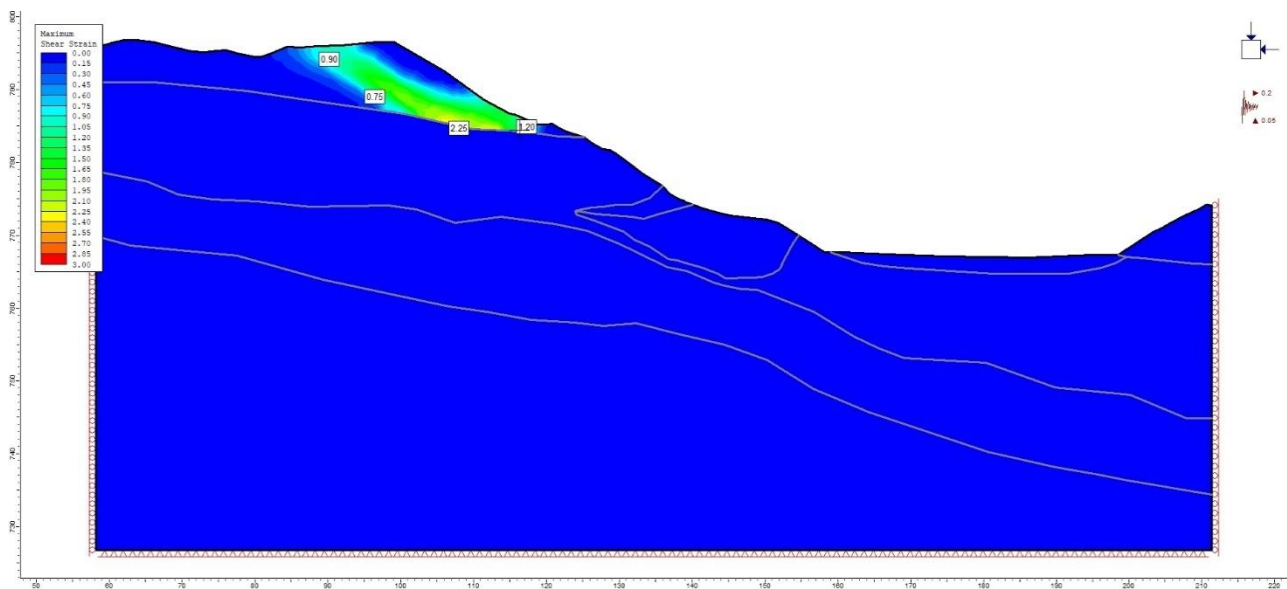


Figura 126. Esfuerzos máximos de cortante en condiciones naturales Perfil A3-A3 Análisis Pseudo-estático.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

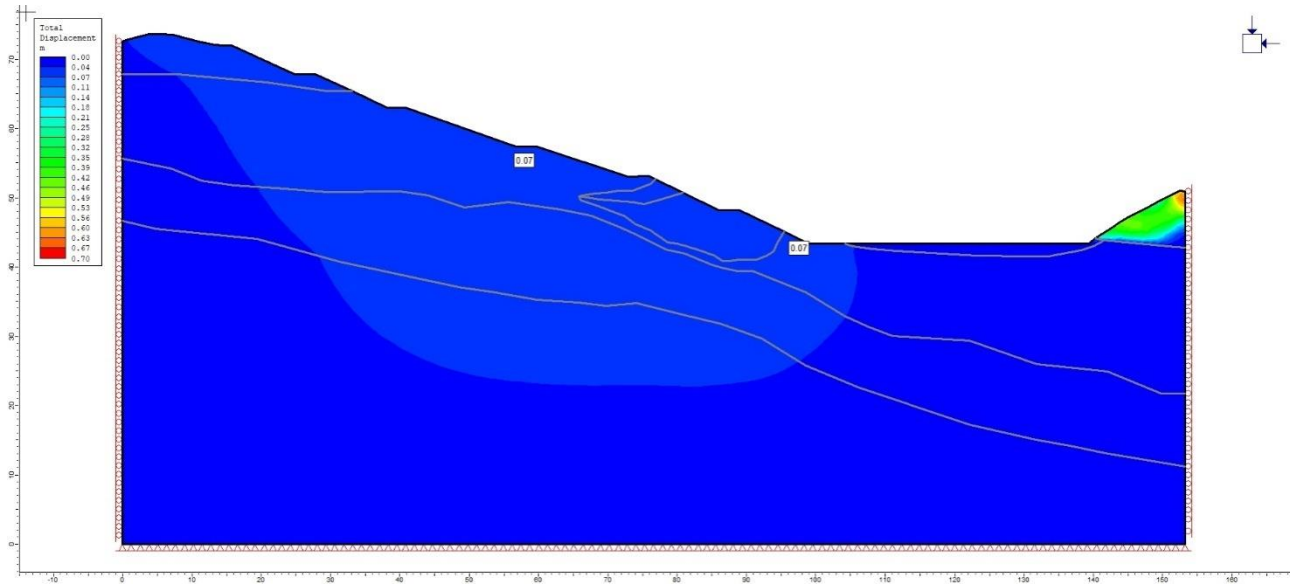


Figura 127. Deformaciones máximas condiciones solución Perfil A3-A3 Análisis estático

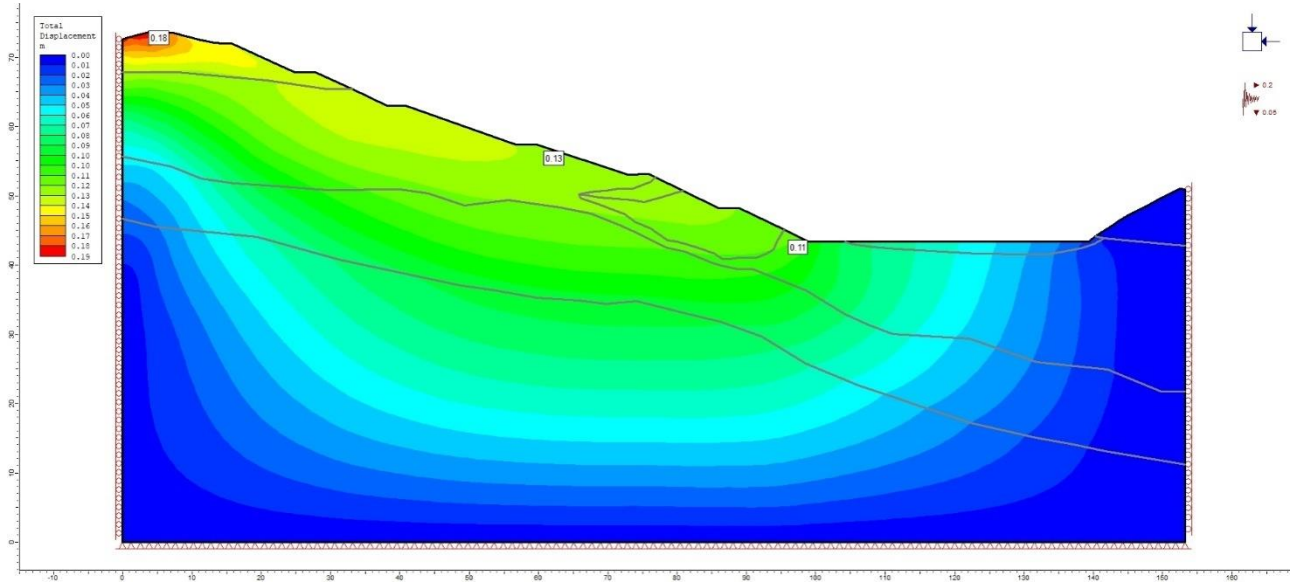


Figura 128. Deformaciones máximas condiciones solución Perfil A3-A3 Análisis Pseudo-estático

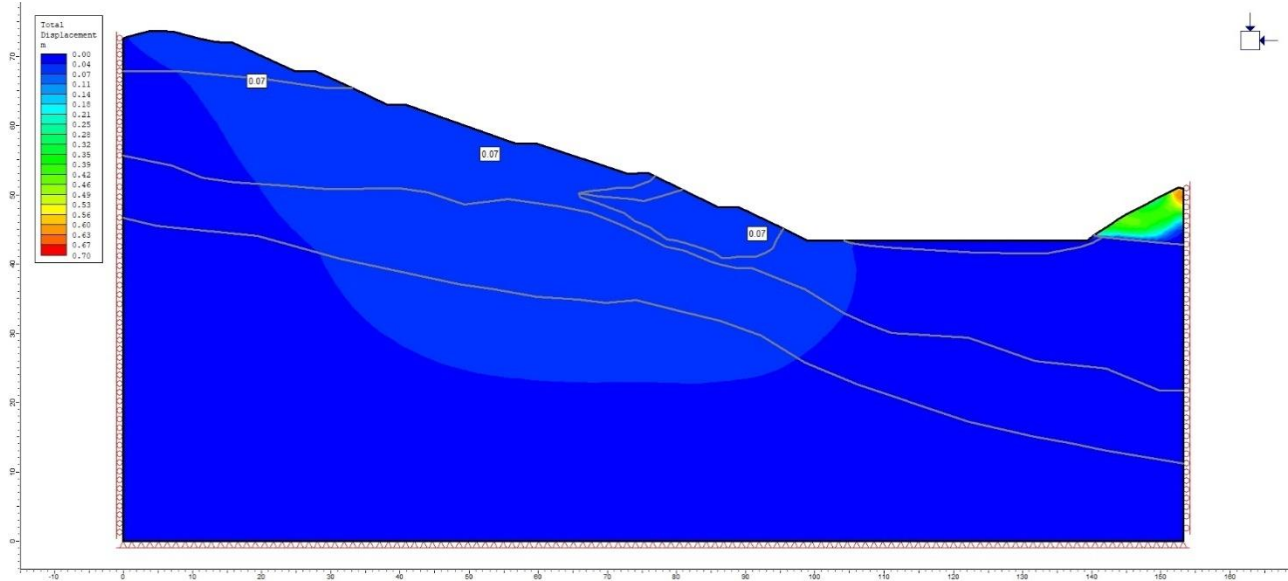


Figura 129. Esfuerzos máximos de cortante para solución 1 Perfil A3-A3 Análisis estático.

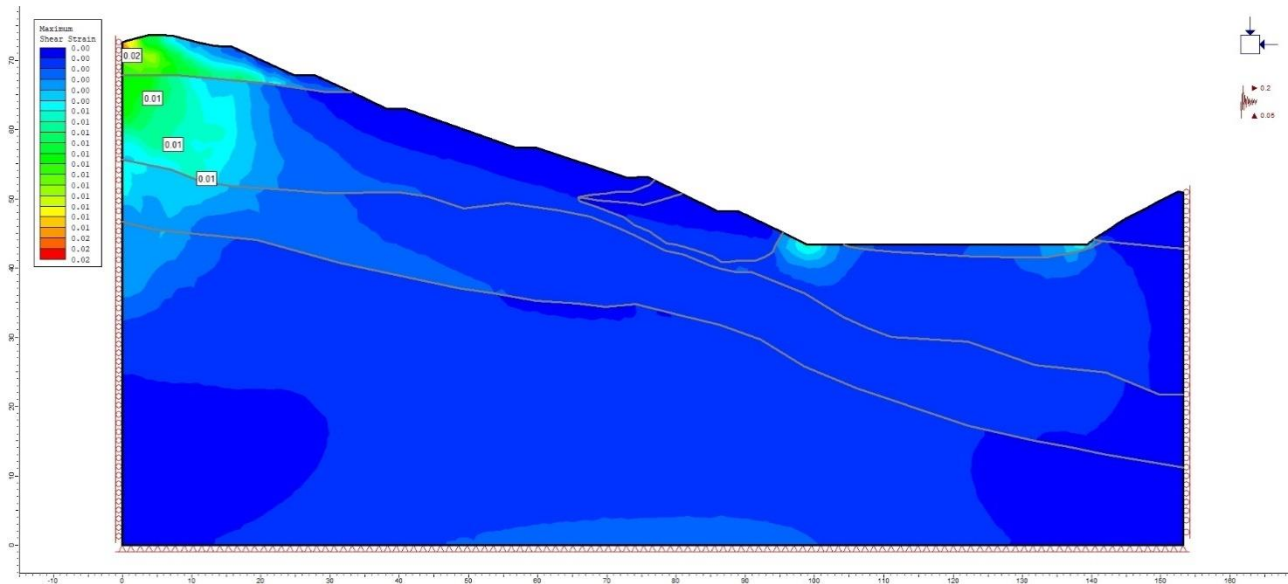


Figura 130. Esfuerzos máximos de cortante para solución 1 Perfil A3-A3 Análisis Pseudo-estático.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

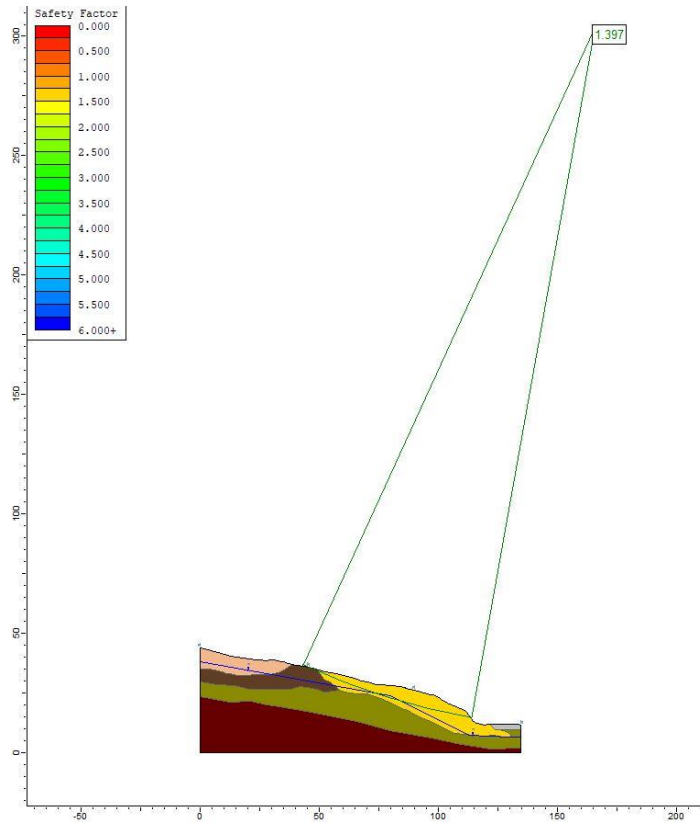


Figura 131. Análisis Global Estático Perfil B1-B1

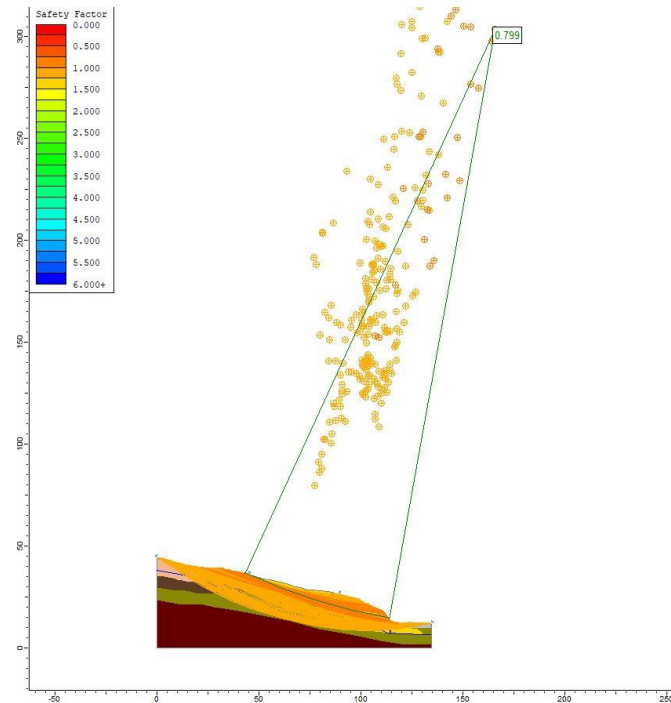


Figura 132. Análisis Global Pseudo-estático Perfil B1-B1

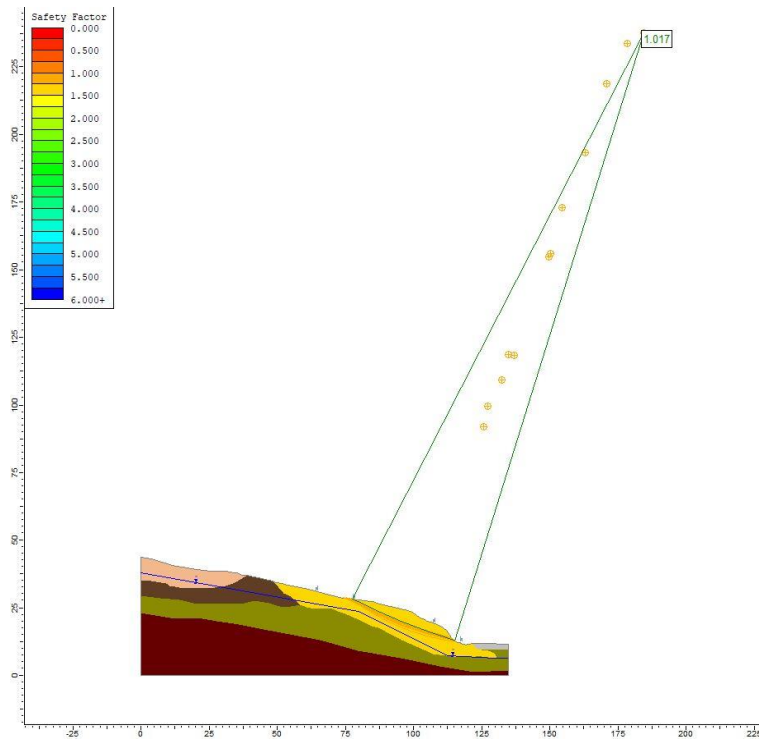


Figura 133. Análisis Local Estático Perfil B1-B1

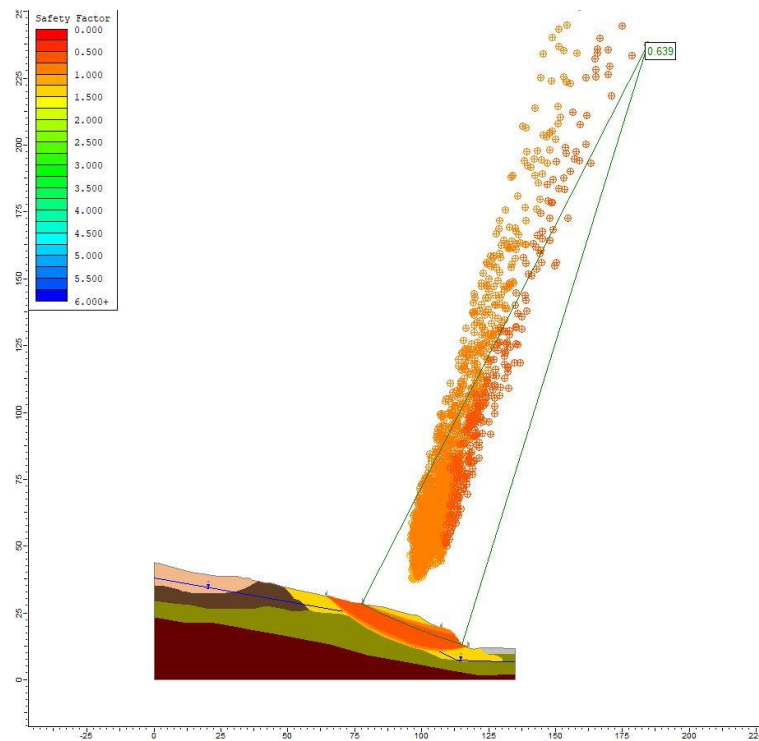


Figura 134. Análisis Local Pseudo-estático Perfil B1-B1

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

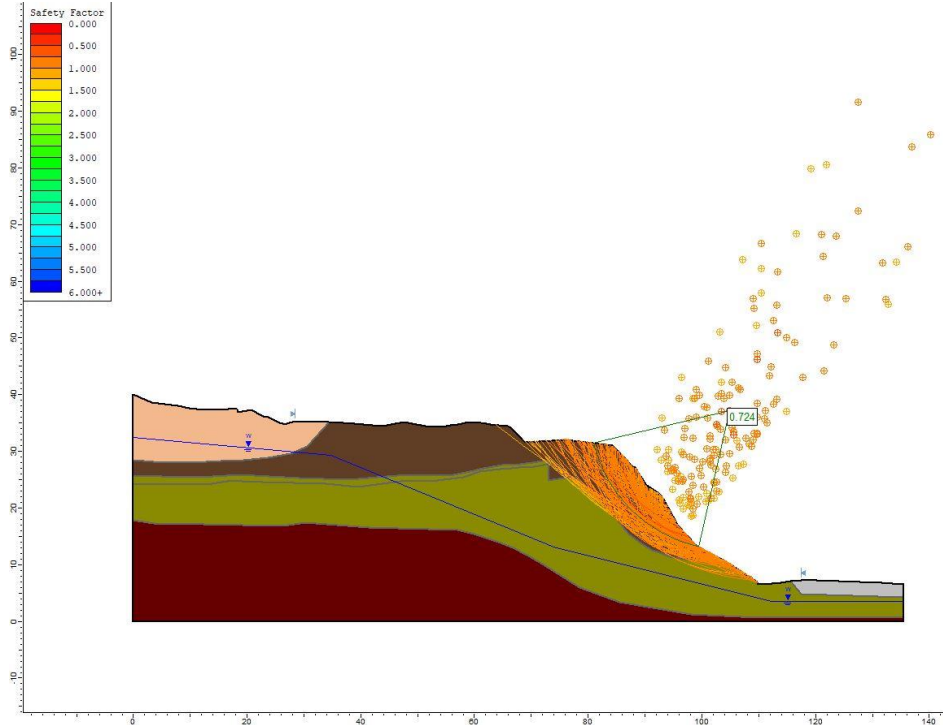


Figura 135. Análisis Global Estático Perfil B2-B2

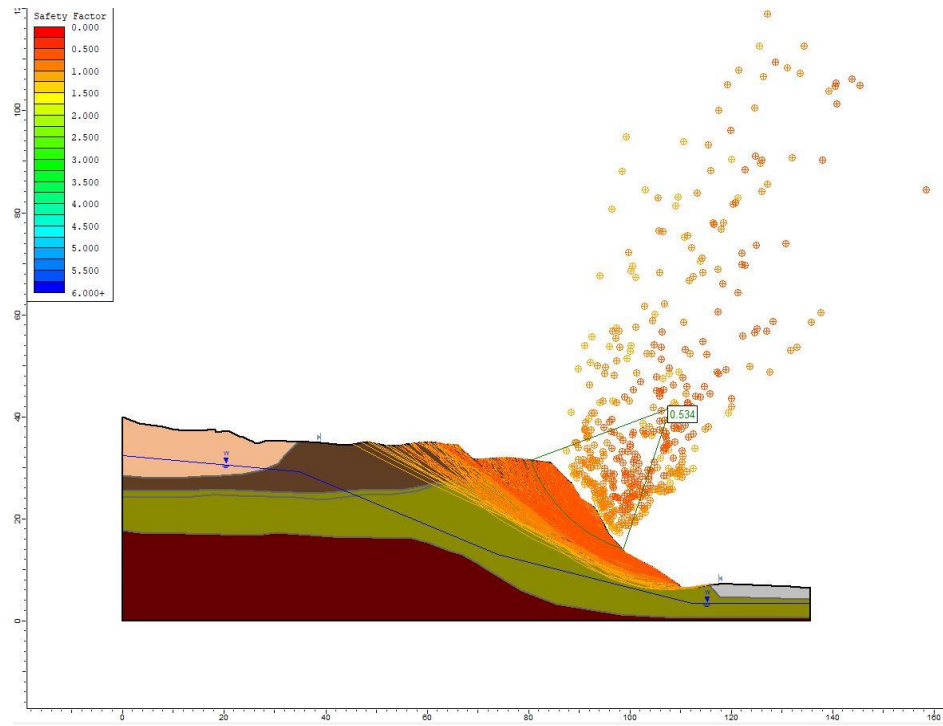


Figura 136. Análisis Global Pseudo-estático Perfil B2-B2

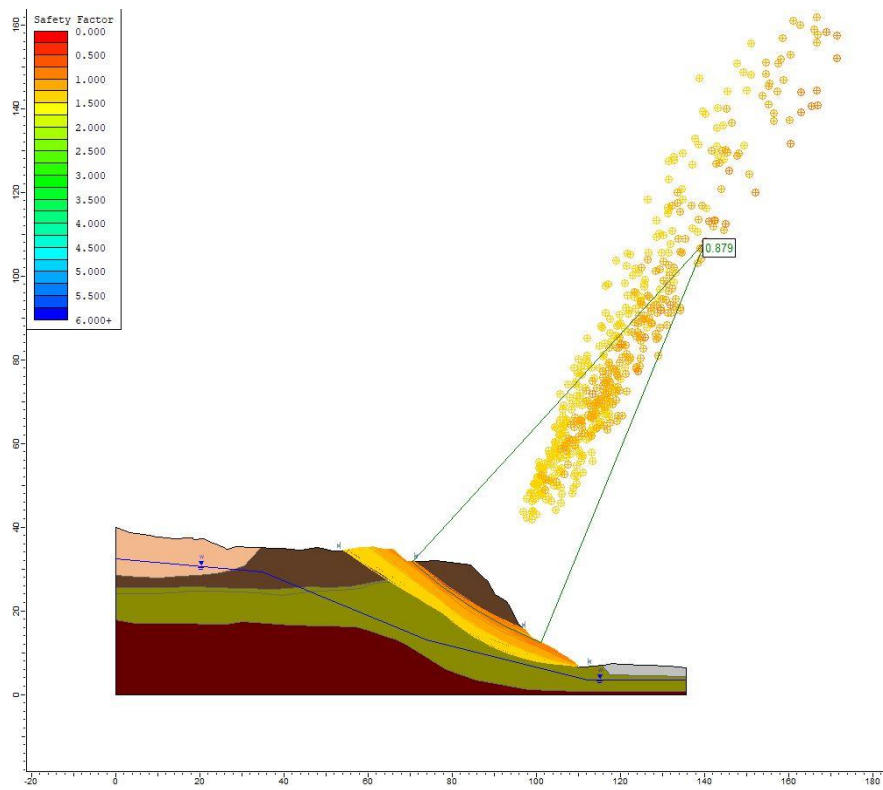


Figura 137. Análisis Local Estático Perfil B2-B2

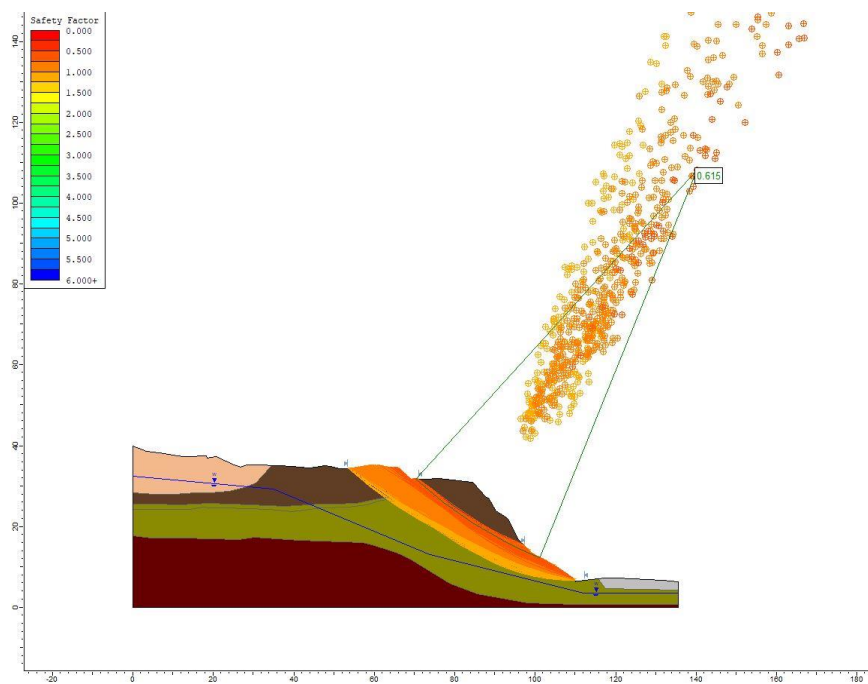


Figura 138. Análisis Local Pseudo-estático Perfil B2-B2

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

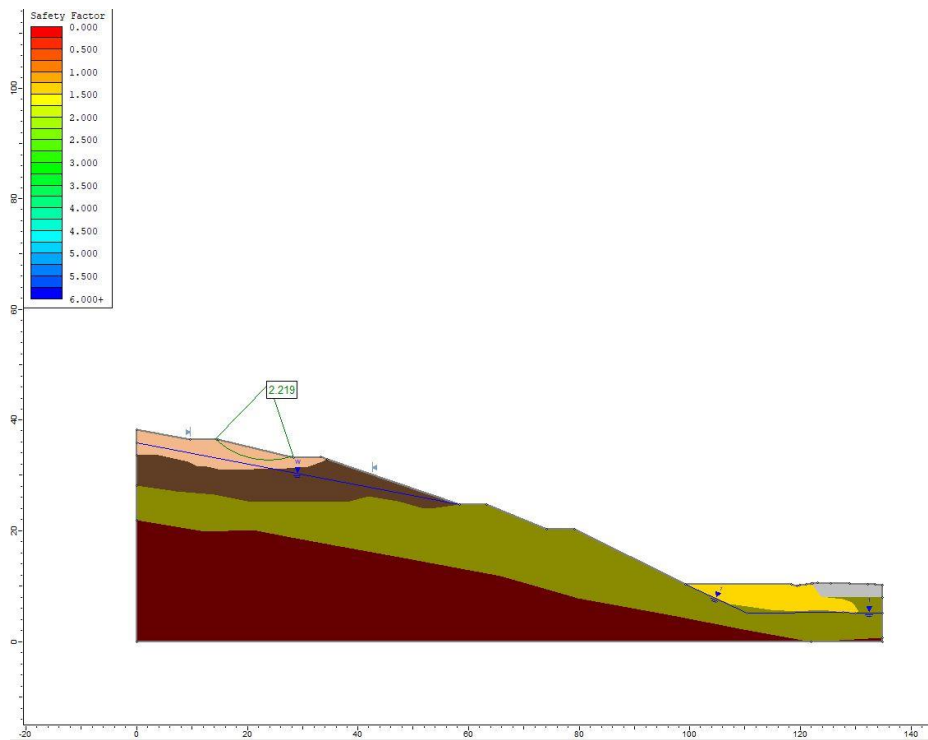


Figura 139. Análisis Global Estático para Solución 1 Perfil B1-B1

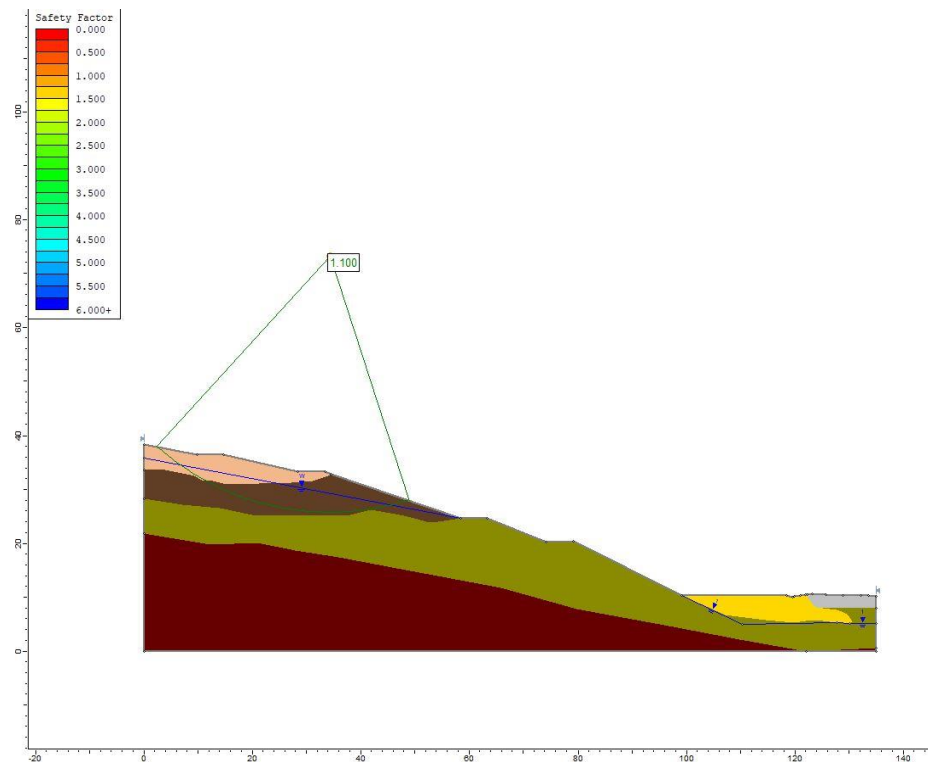


Figura 140. Análisis Global Pseudo-estático para Solución 1 Perfil B1-B1

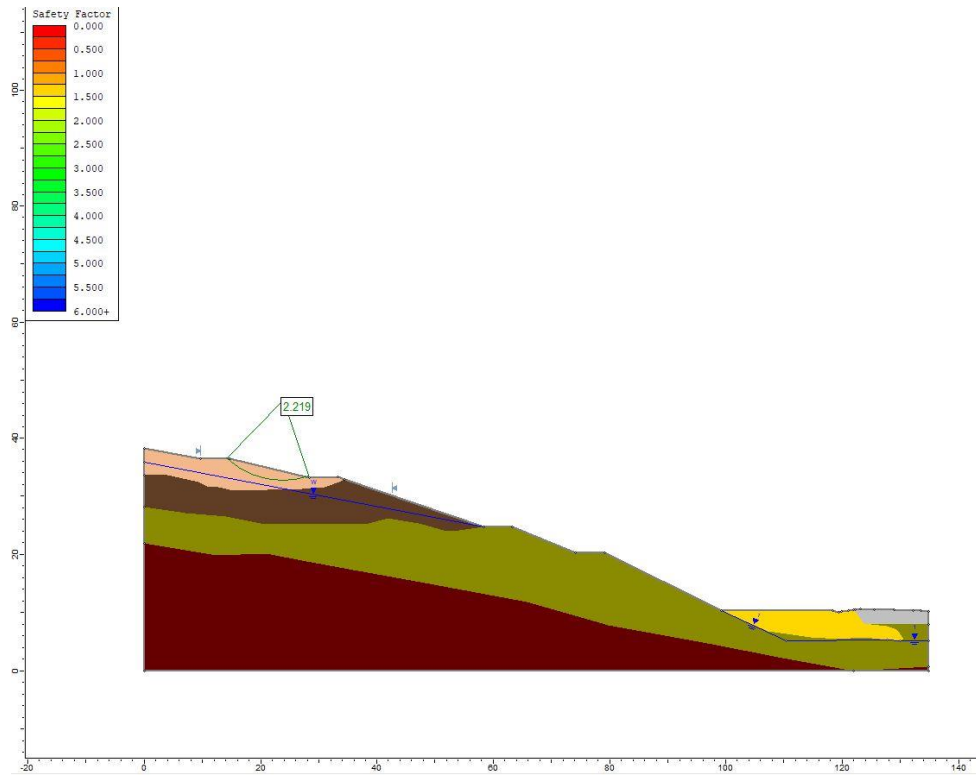


Figura 141. Análisis Local Estático para Solución 1 Perfil B1-B1

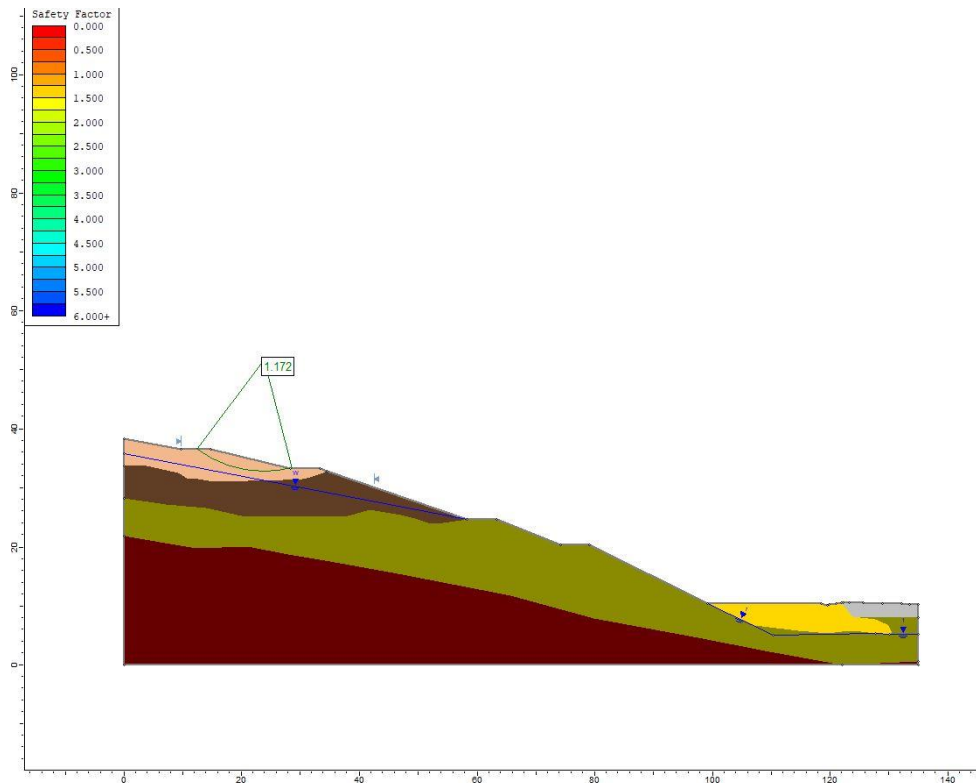


Figura 142. Análisis Local Pseudo-estático para solución 1 Perfil B1-B1

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

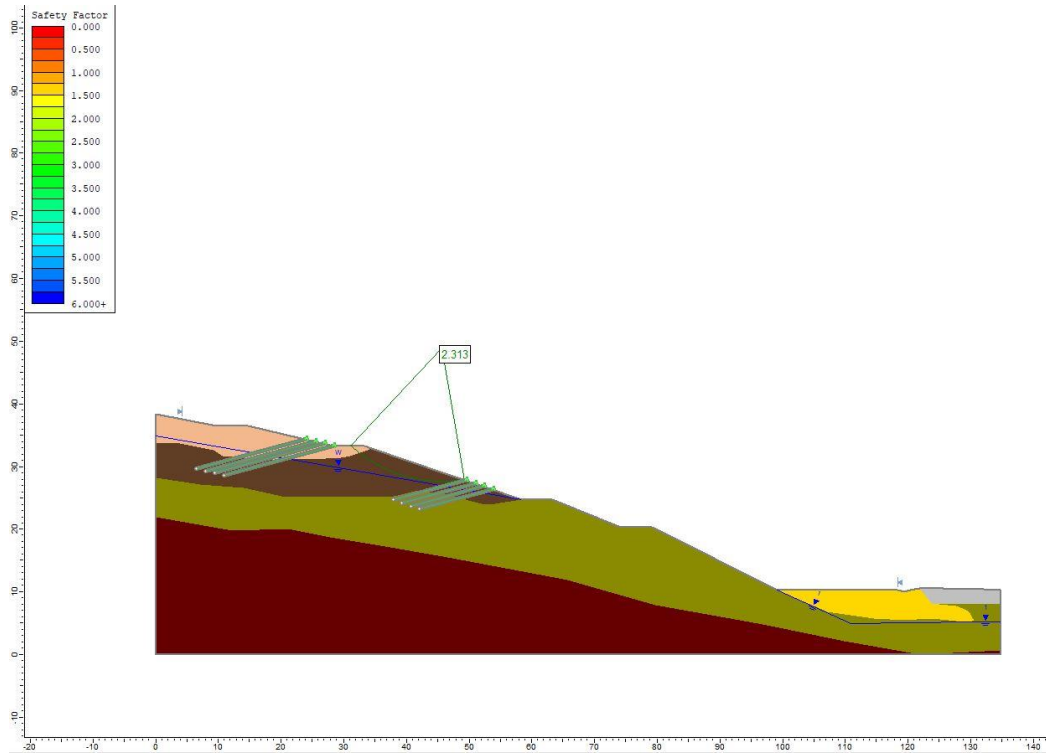


Figura 143. Análisis Global Estático para Solución 2 Perfil B1-B1

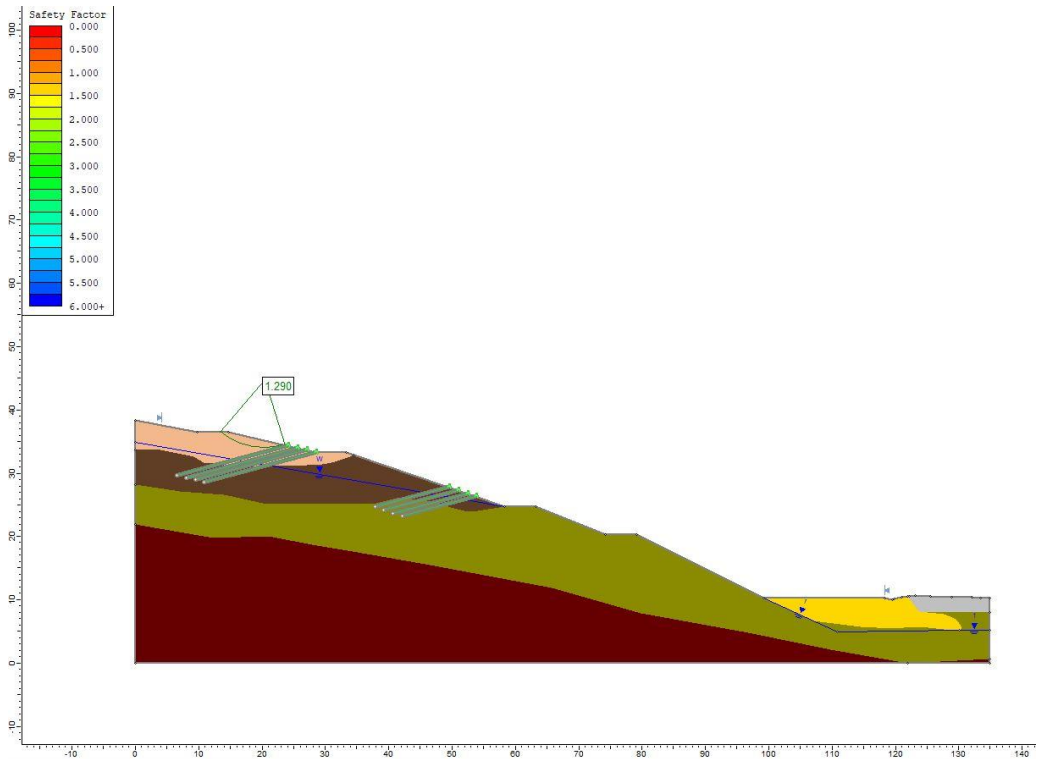


Figura 144. Análisis Global Pseudo-estático para Solución 1 Perfil B1-B1

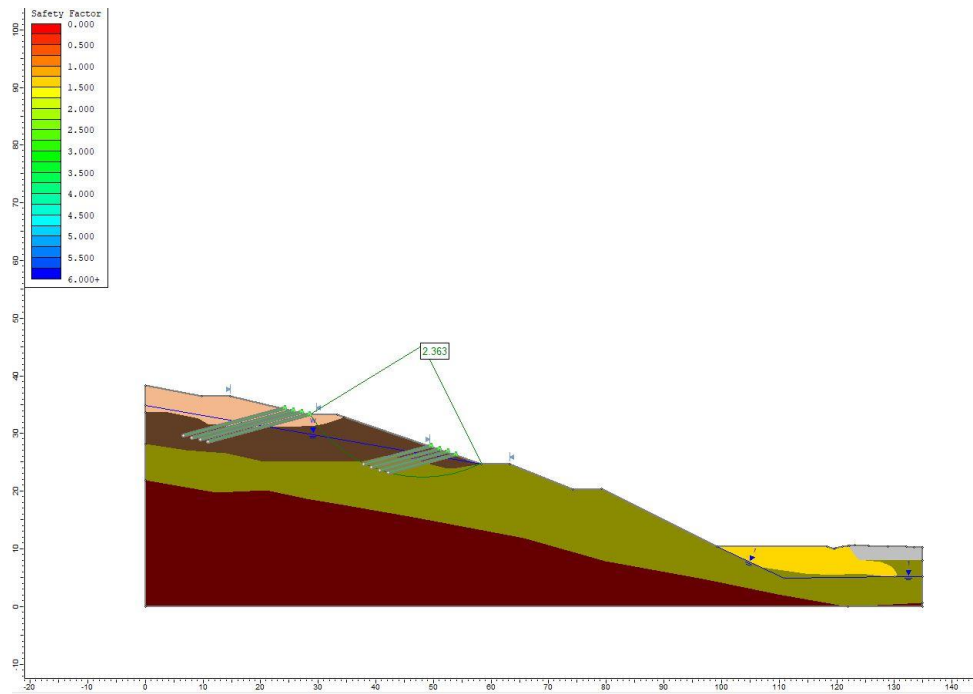


Figura 145. Análisis Local Estático para Solución 1 Perfil B1-B1

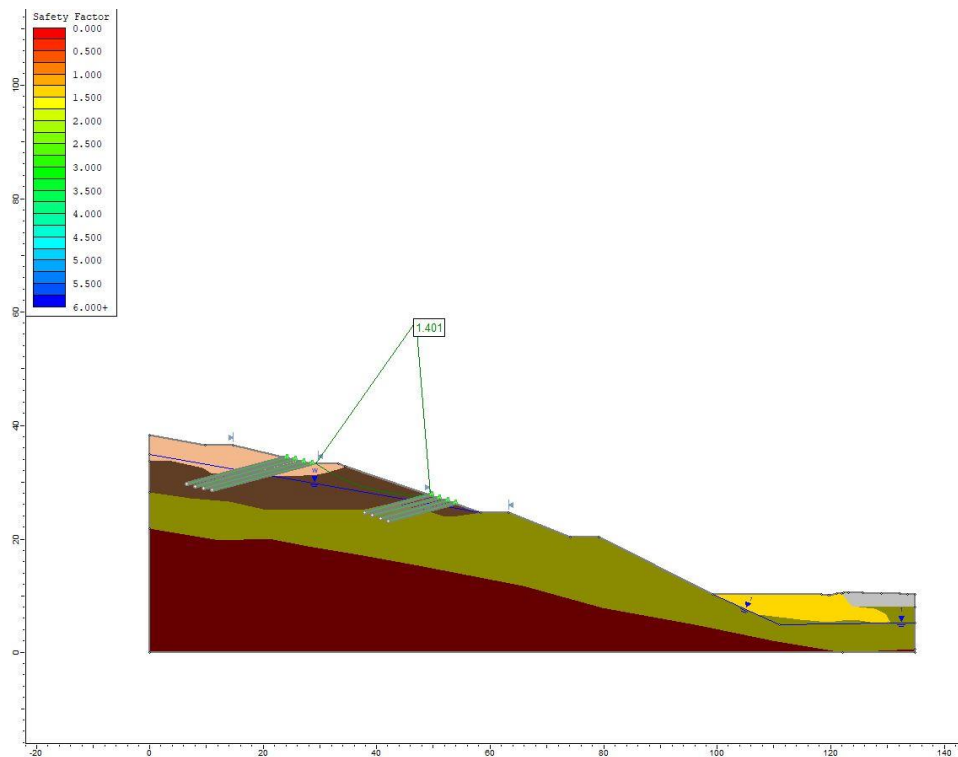


Figura 146. Análisis Local Pseudo-estático para solución 1 Perfil B1-B1

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

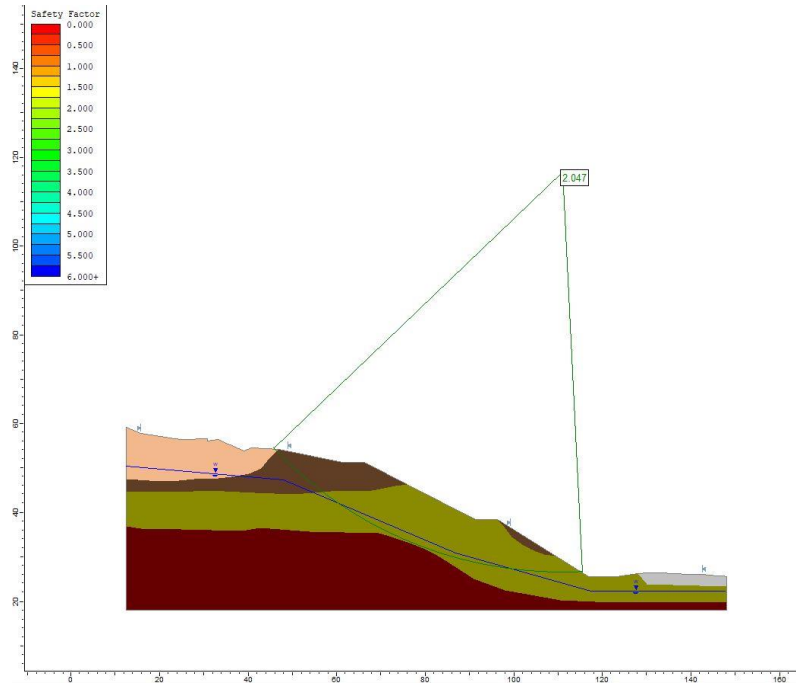


Figura 147. Análisis Global Estático para Solución 1 Y 2 Perfil B2-B2

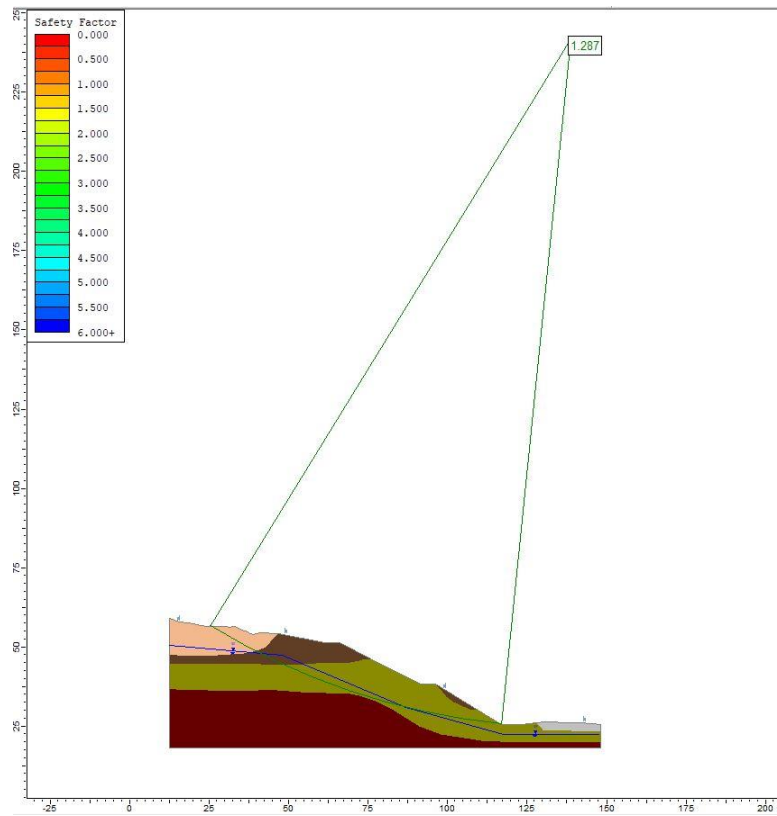


Figura 148. Análisis Global Pseudo-estático para Solución 1 y 2 Perfil B2-B2

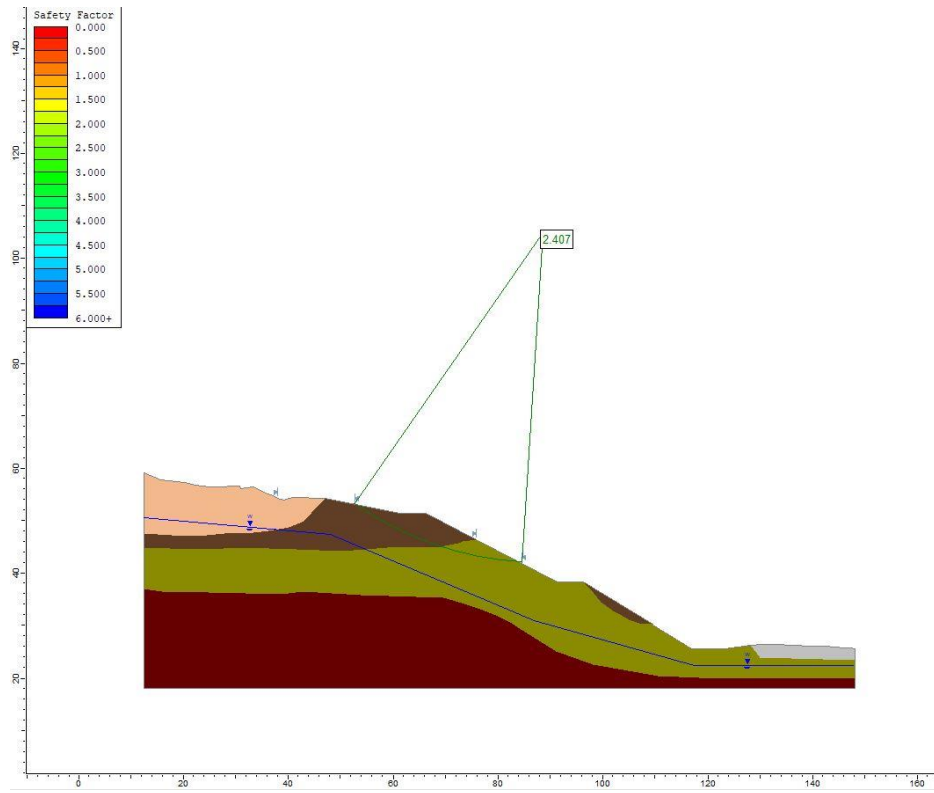


Figura 149. Análisis Local Estático para Solución 1 y 2 Perfil B2-B2

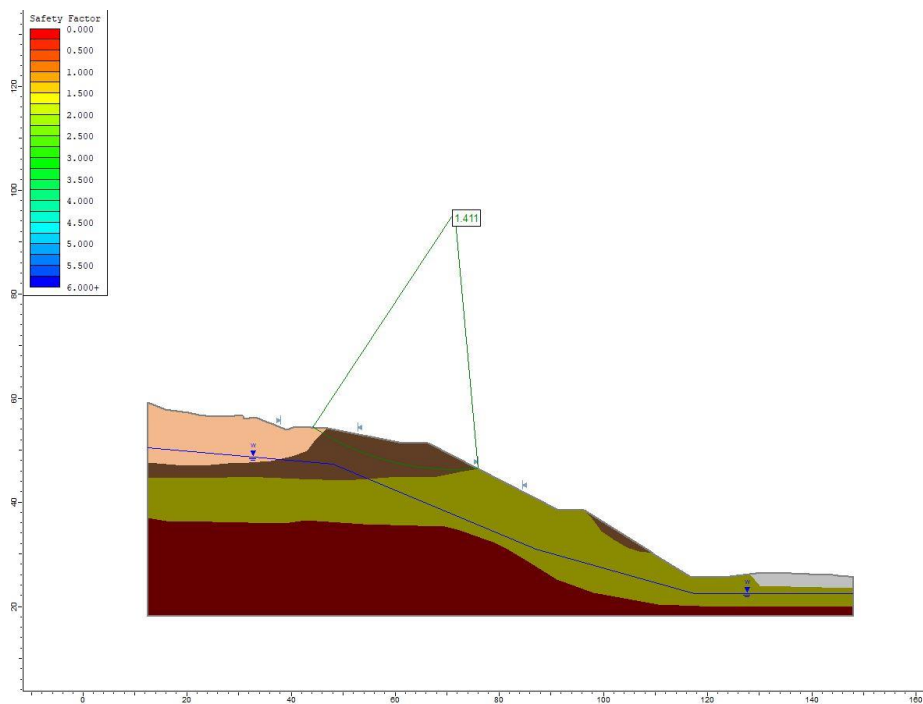


Figura 150. Análisis Local Pseudo-estático para solución 1 y 2 Perfil B2-B2

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

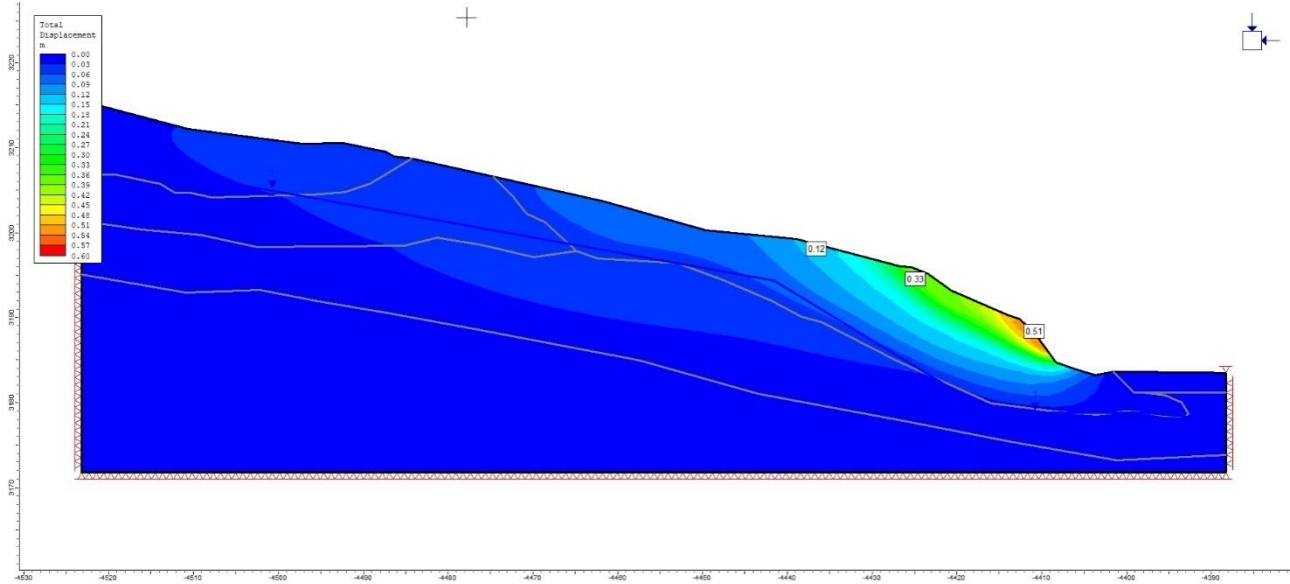


Figura 151. Deformaciones máximas condiciones naturales Perfil B1-B1 Análisis estático

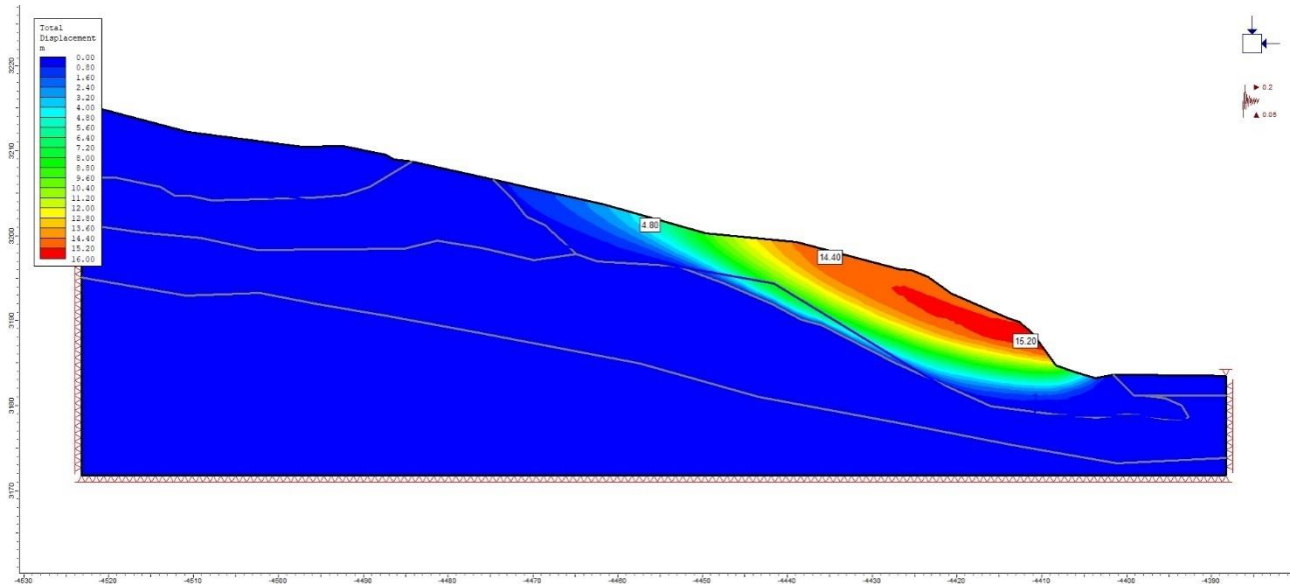


Figura 152. Deformaciones máximas condiciones naturales Perfil B1-B1 Análisis Pseudo-estático

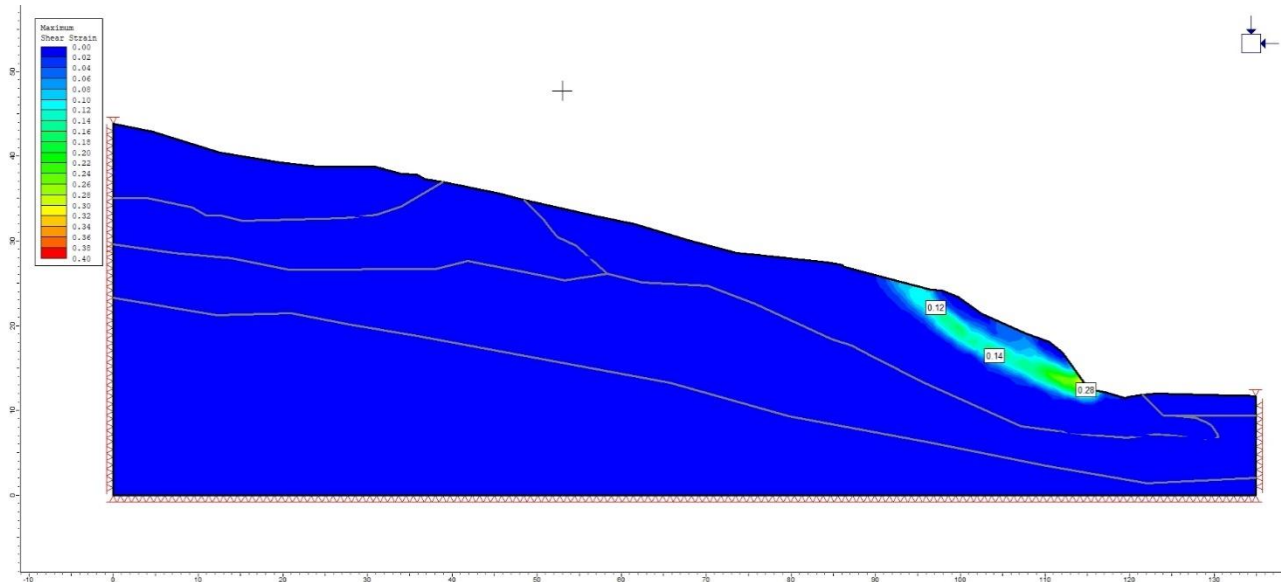


Figura 153. Esfuerzos máximos de cortante en condiciones naturales Perfil B1-B1 Análisis estático.

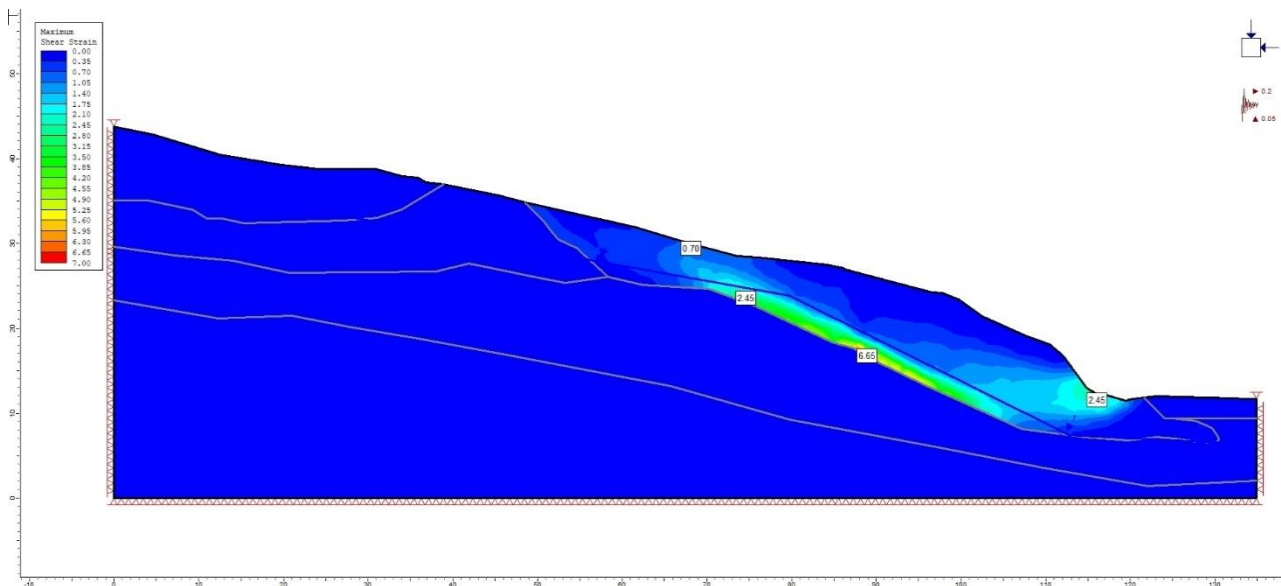


Figura 154. Esfuerzos máximos de cortante en condiciones naturales Perfil B1-B1 Análisis Pseudo-estático.

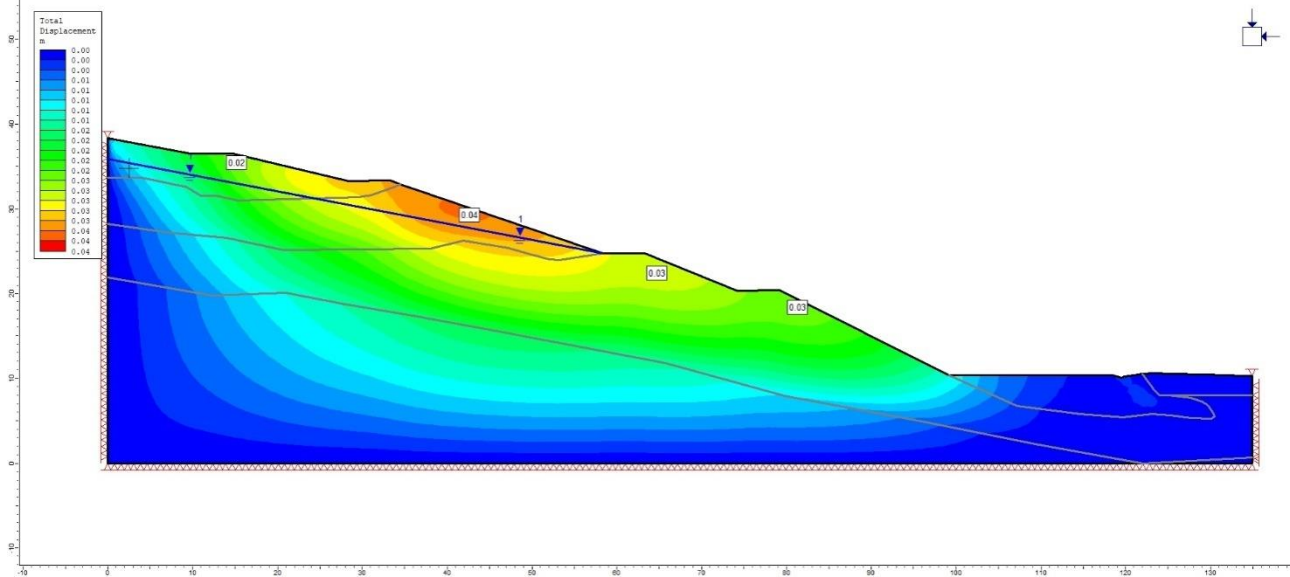


Figura 155. Deformaciones máximas condiciones solución 1 Perfil B1-B1 Análisis estático.

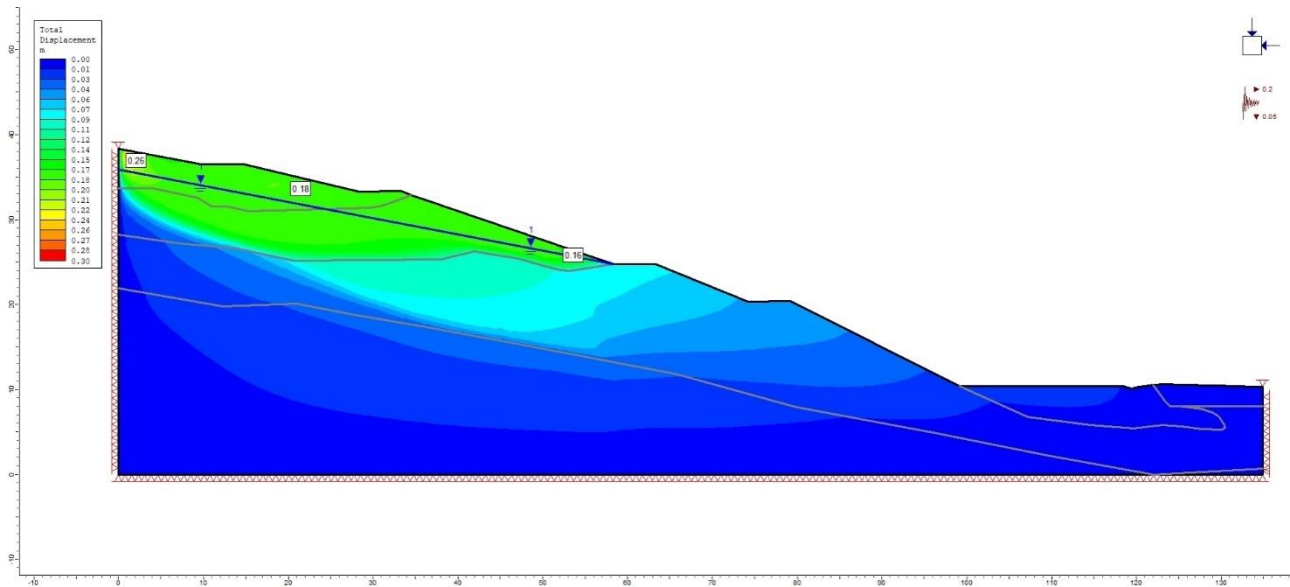


Figura 156. Deformaciones máximas condiciones solución 1 Perfil B1-B1 Análisis Pseudo-estático.

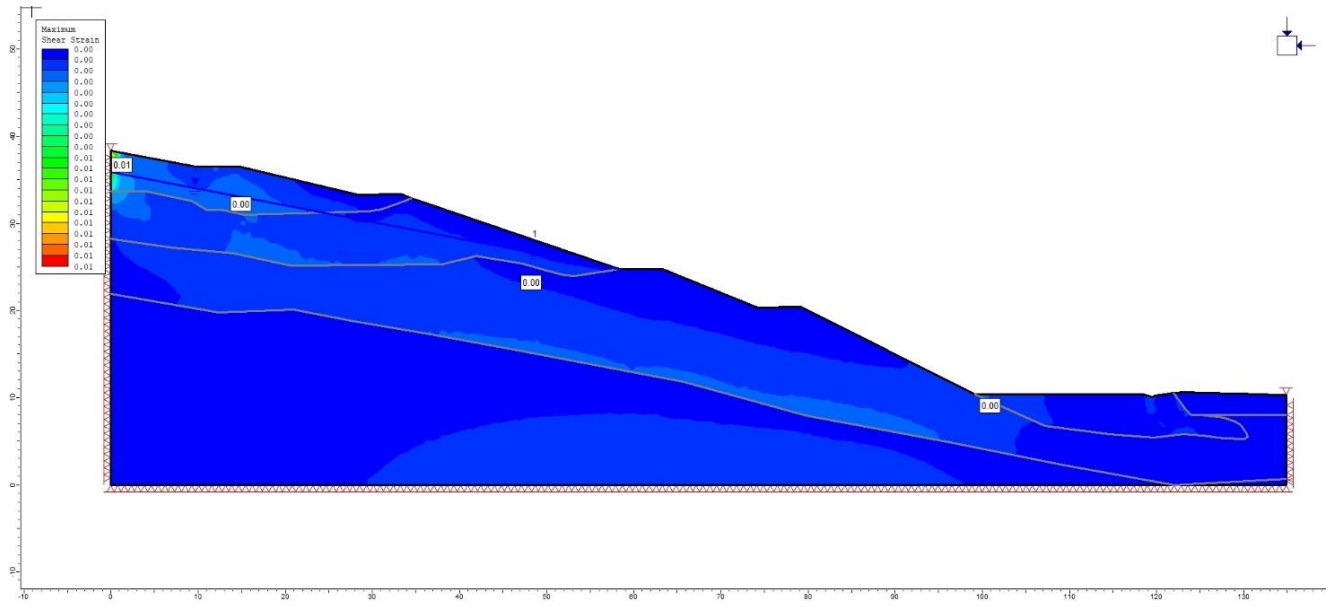


Figura 157. Esfuerzos máximos de cortante para solución 1 Perfil B1-B1 Análisis estático.

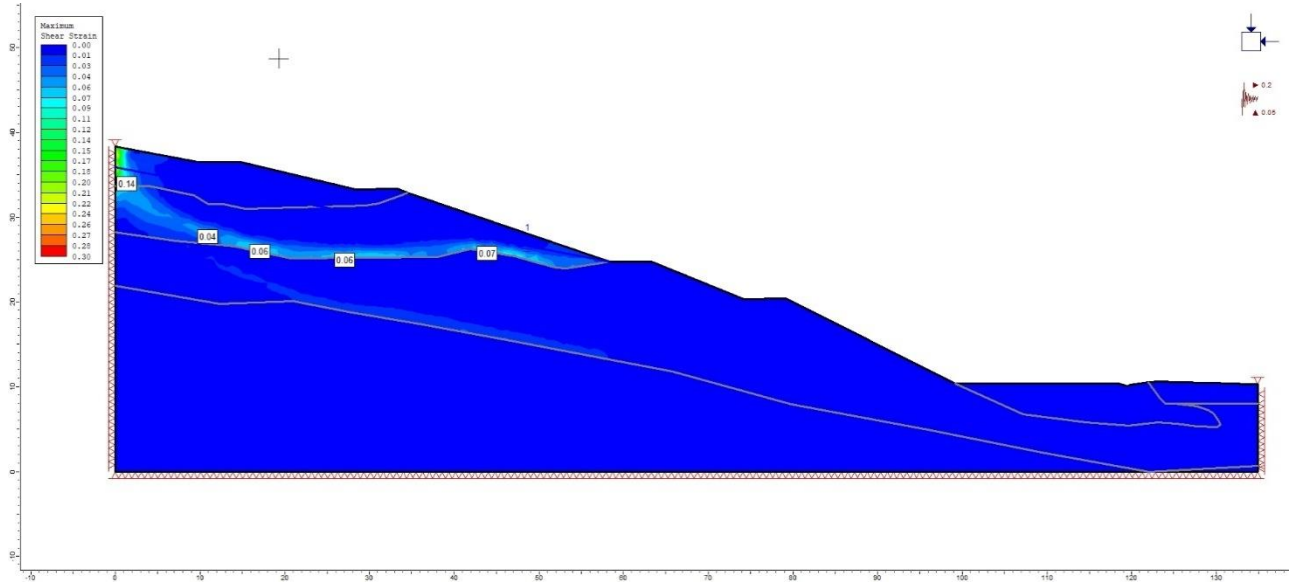


Figura 158. Esfuerzos máximos de cortante para solución 1 Perfil B1-B1 Análisis Pseudo-estático.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

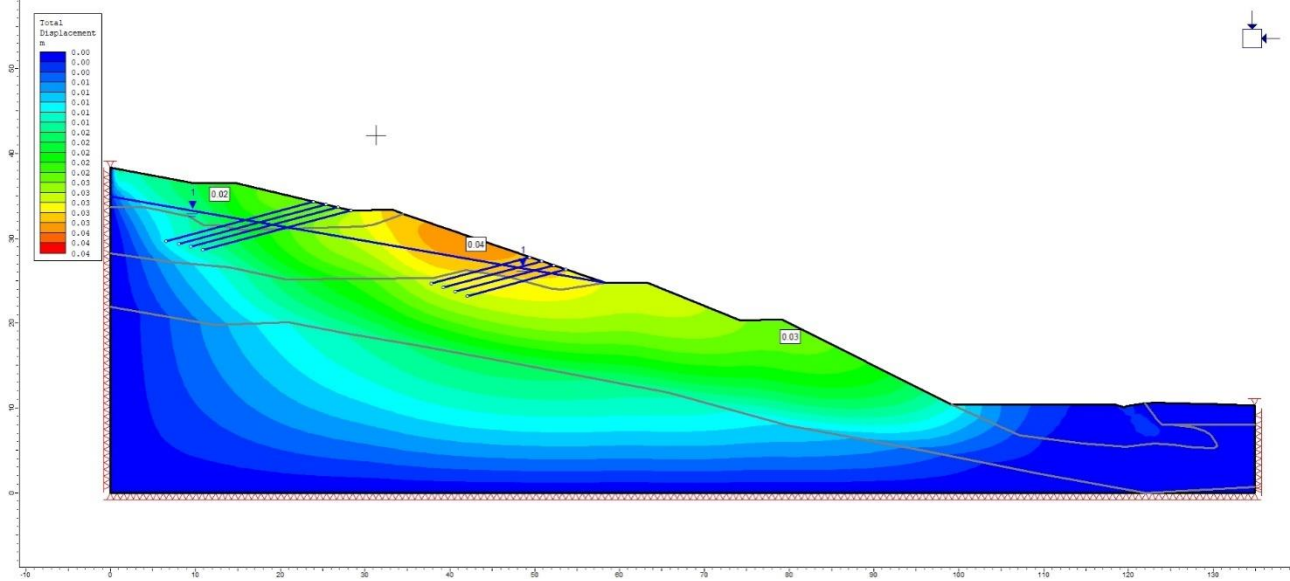


Figura 159. Deformaciones máximas condiciones solución 2 Perfil B1-B1 Análisis estático

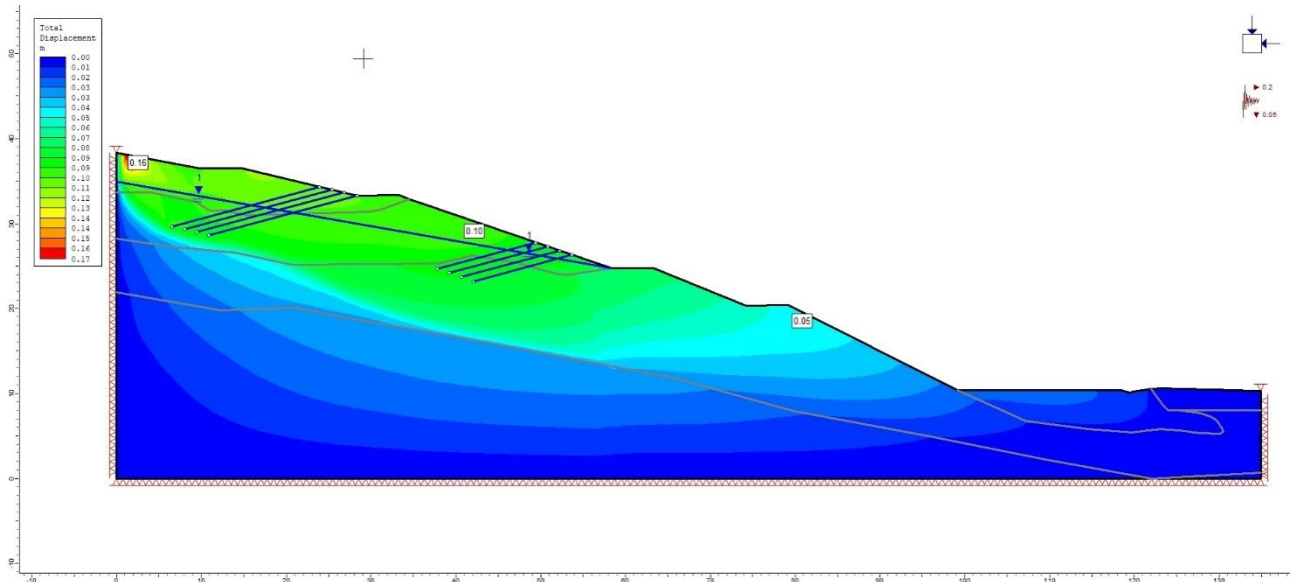


Figura 160. Deformaciones máximas condiciones solución 2 Perfil B1-B1 Análisis Pseudo-estático

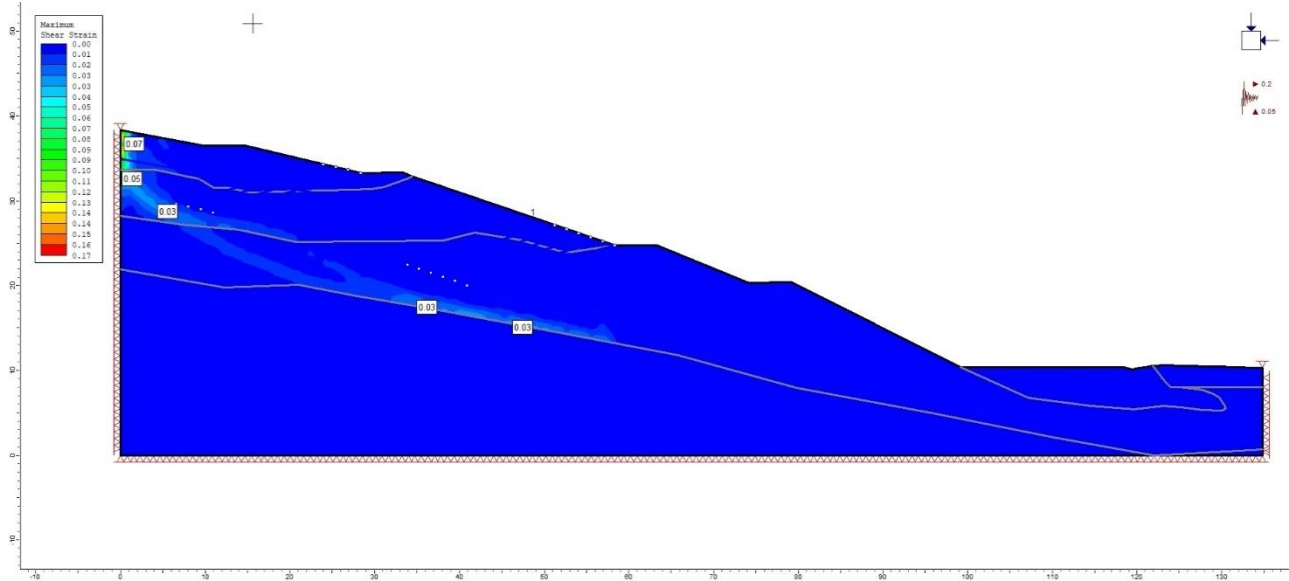


Figura 161. Esfuerzos máximos de cortante para solución 2 Perfil B1-B1 Análisis estático.

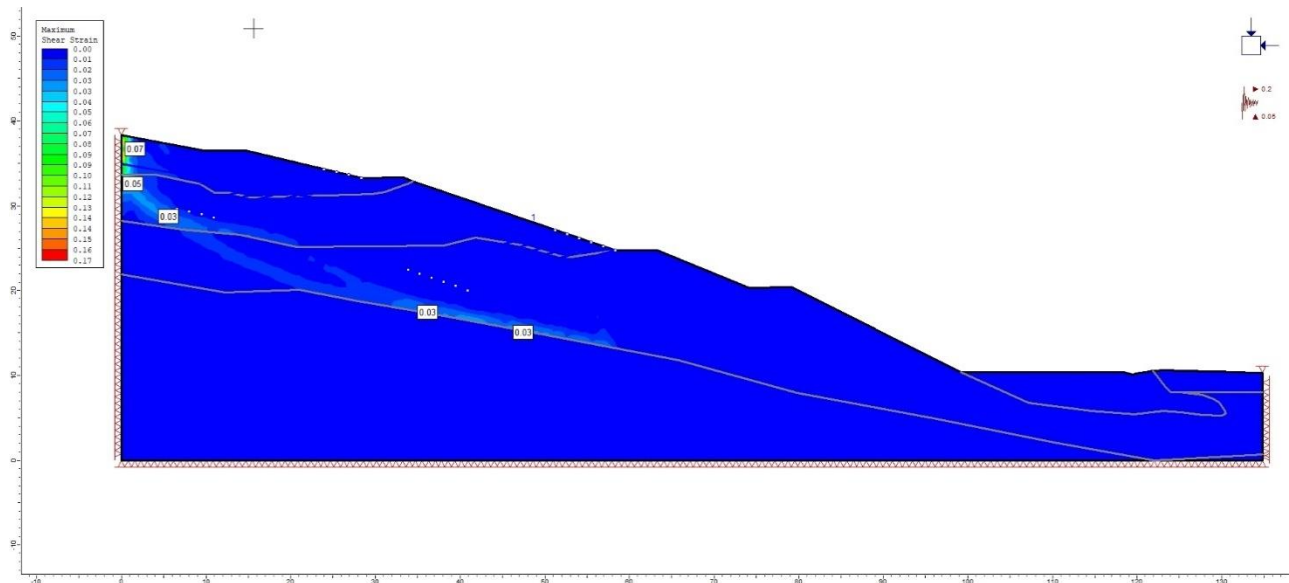


Figura 162. Esfuerzos máximos de cortante para solución 2 Perfil B1-B1 Análisis Pseudo-estático.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

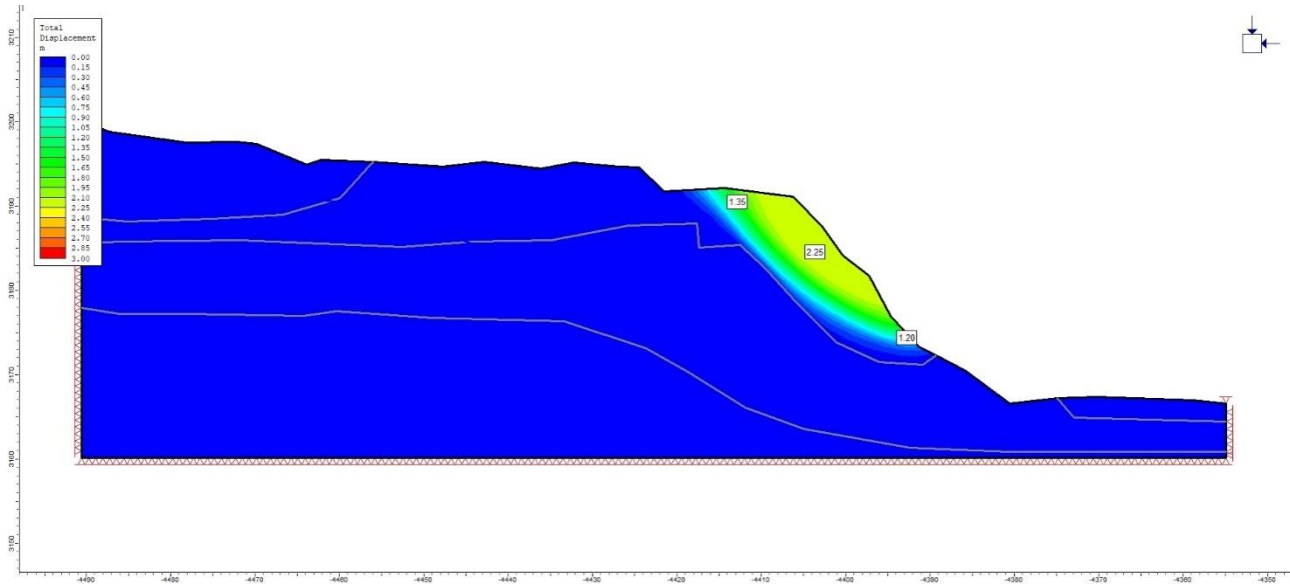


Figura 163. Deformaciones máximas condiciones naturales Perfil B2-B2' Análisis Pseudo-estático.

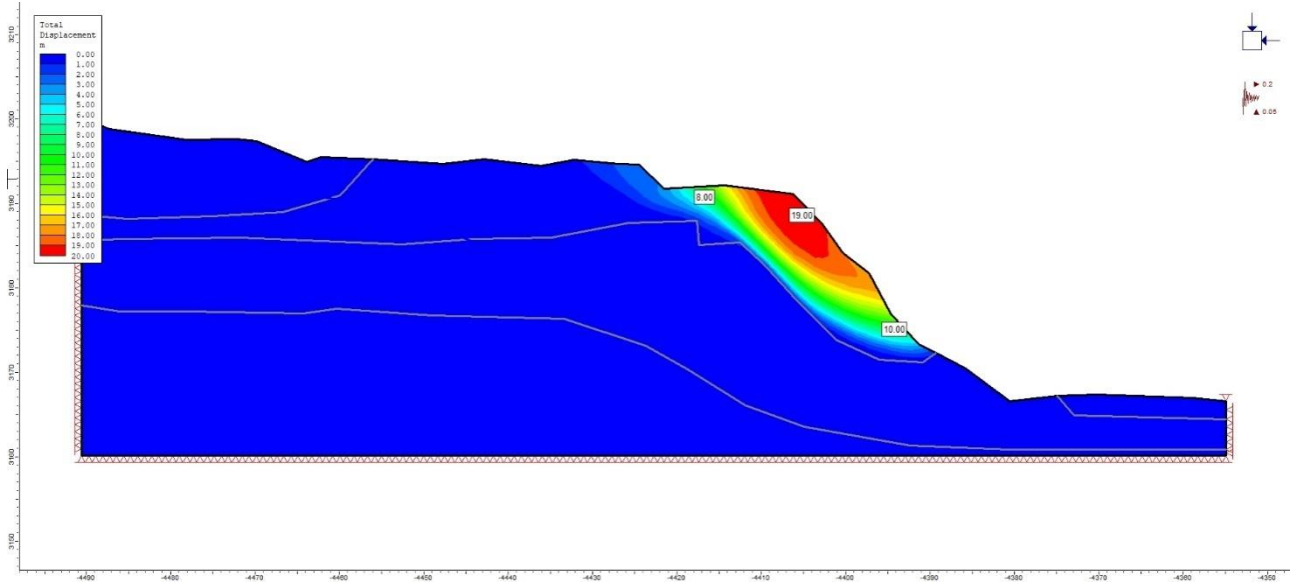


Figura 164. Deformaciones máximas condiciones naturales Perfil B2-B2 Análisis Pseudo-estático

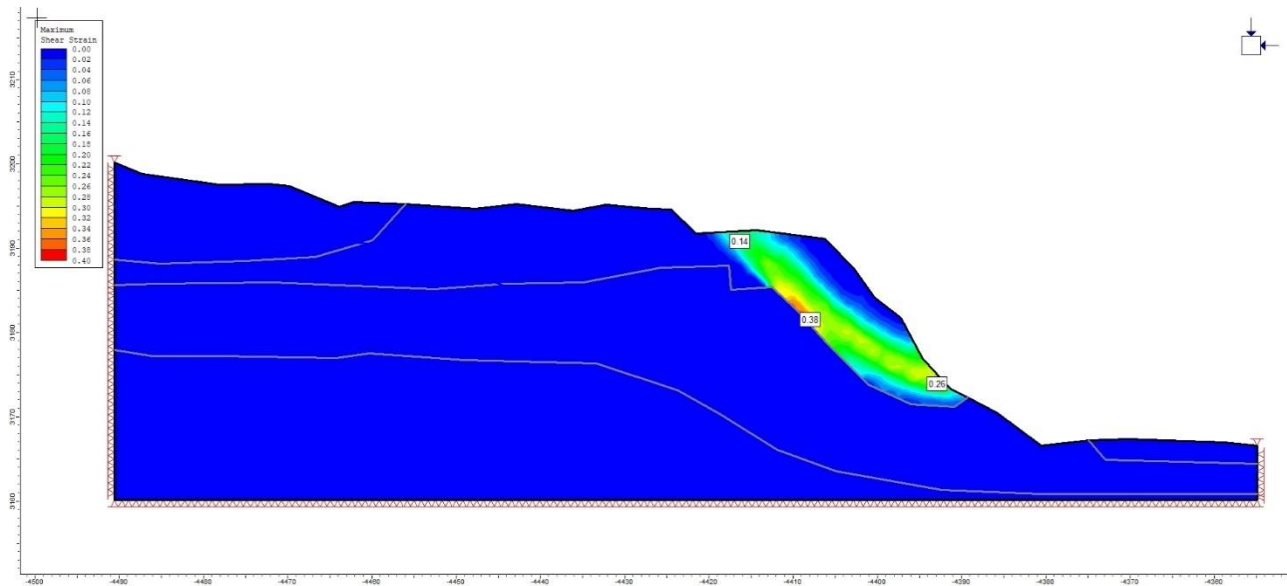


Figura 165. Esfuerzos máximos de cortante para condición natural Perfil B2-B2 Análisis estático.

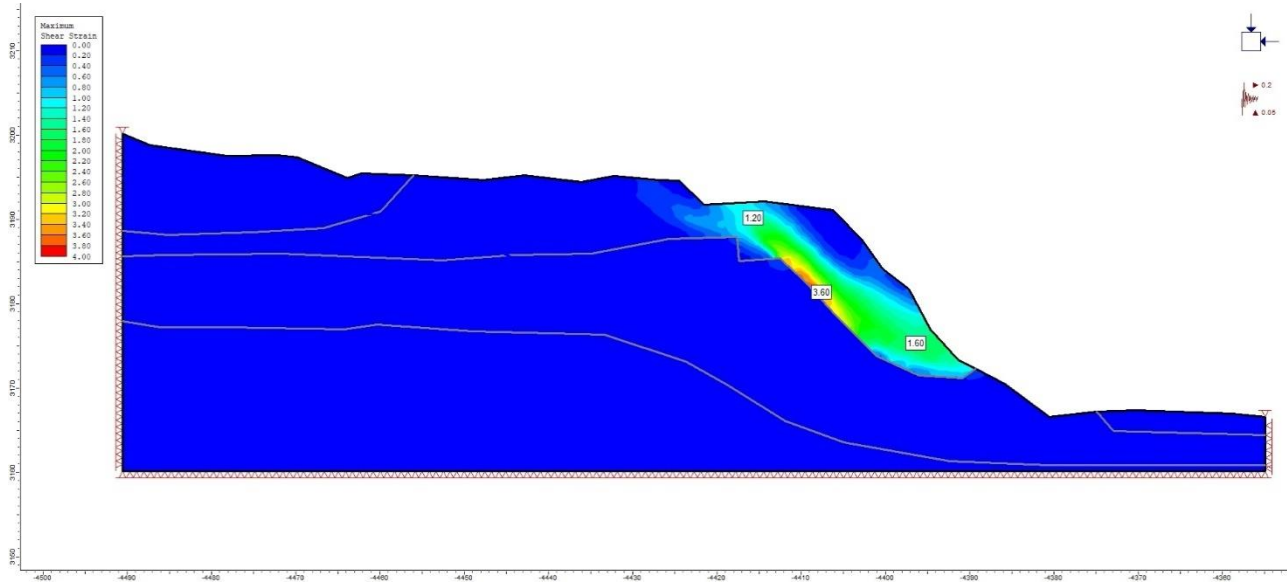


Figura 166. Esfuerzos máximos de cortante para condición natural Perfil B2-B2 Análisis Pseudo-estático.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

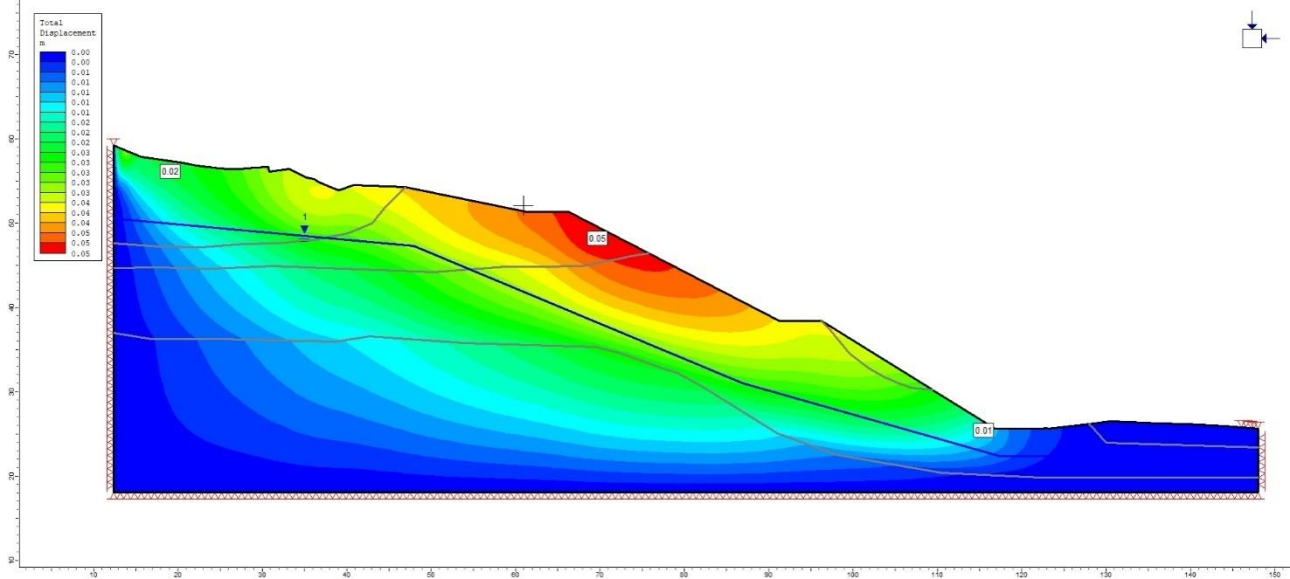


Figura 167. Deformaciones máximas condiciones solución Perfil B2-B2 Análisis estático

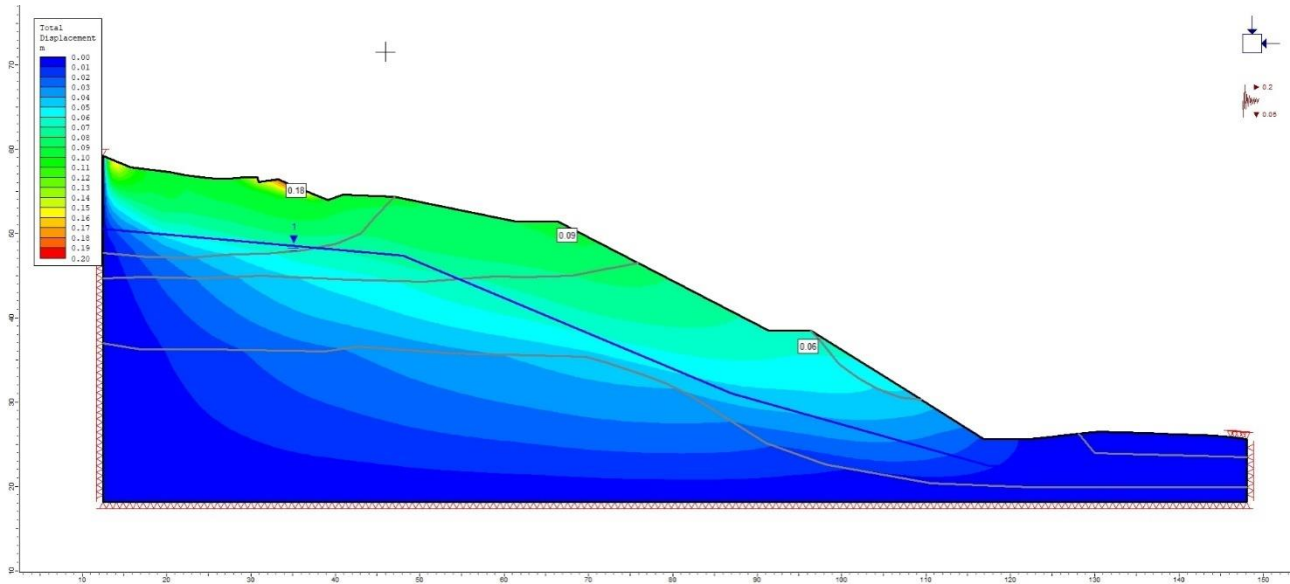


Figura 168. Deformaciones máximas condiciones solución Perfil B2-B2 Análisis Pseudo-estático

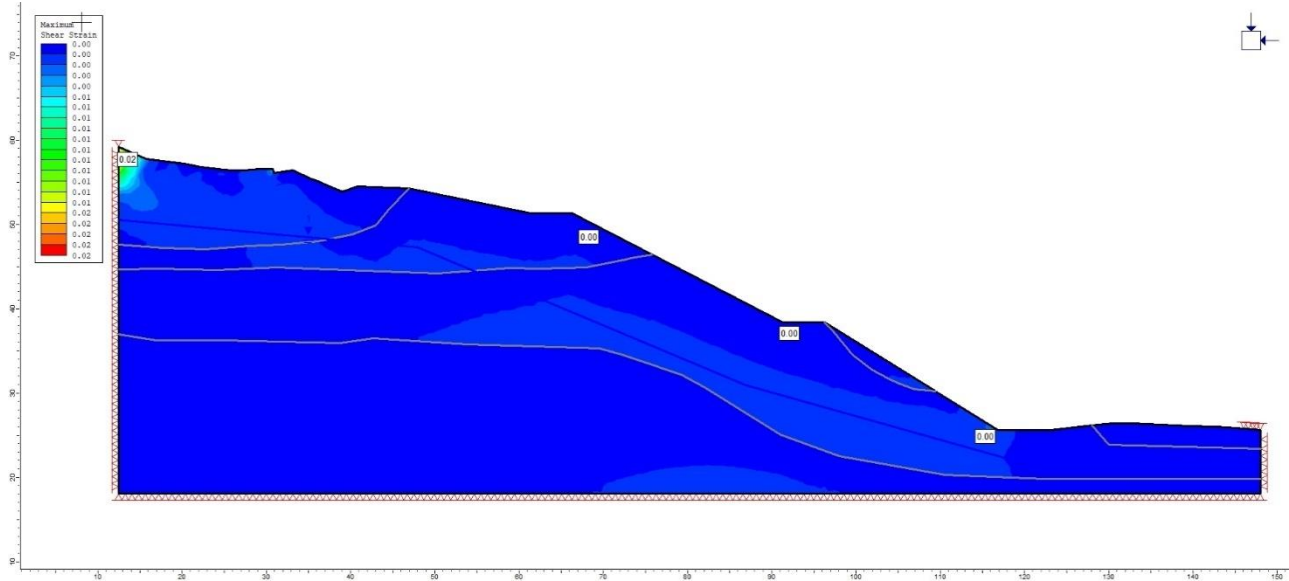


Figura 169. Esfuerzos máximos de cortante para solución 1 Perfil B2-B2 Análisis estático.

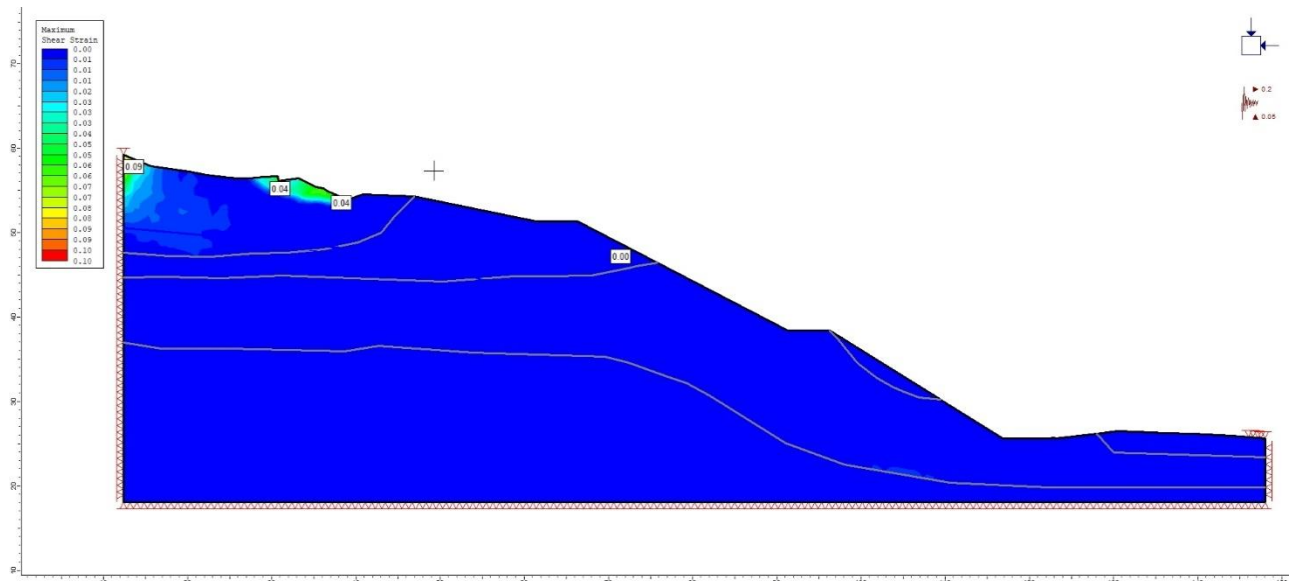


Figura 170. Esfuerzos máximos de cortante para solución 1 Perfil B2-B2 Análisis pseudo-estático.

Evaluación de sectores vulnerables de la ruta nacional 35, tramo Sifón- La Abundancia y planeamiento de acciones correctivas y de monitoreo.

## Apéndice 7: Memoria de cálculo para anclajes pasivos

### Anclajes pasivos talud superior:

#### Diseño de anclajes pasivos por tensión.

Unidad Perno	Longitud UG1	Longitud UG2	Longitud total	qs	Tu1	Esfuerzo	T máx. con FS=2	Valor Comp	FS Real
P1	11,04 m	6,96 m	18,00 m	0,04	152,85	11,82	76,42	86,67	1,76
P2	10,96 m	7,04 m	18,00 m	0,04	153,61	11,88	76,81	86,67	1,77
P3	9,86 m	8,14 m	18,00 m	0,04	164,09	12,69	82,04	86,67	1,89
P4	8,36 m	9,65 m	18,00 m	0,04	178,54	13,81	89,27	86,67	2,06
Promedio				0,04	Promedio	12,55			

#### Tracción de servicio de perno

Factor de expansión de bulbo de inyección	a	1	
Diámetro nominal	Dn	3	in
Diámetro de perforación	Dp	0,0762	m
Separación horizontal de anclaje	Sh	1,5	m
Factor de Seguridad	FS	2	
Capacidad de fricción última del terreno	qs	0,04	MPa
Longitud perno	Lb1	18	m
Tracción límite del perno	$T = \frac{a * Dp * qs * \pi * Lb}{FS}$	Tu1	162,27 KN
Tracción de servicio del perno		Tmax1	81,14 KN

#### Tensión admisible del acero del perno

Varilla N°	7		
Límite elástico del acero de la barra	fy	420	MPa
Diámetro nominal de la barra de acero	Ds	22,22	mm
Área nominal de la barra de acero	As	3,87	cm <sup>2</sup>
Resistencia última de la varilla de acero	fub = fy*As	fub	162,54 kN
Factor de reducción de la resistencia de la varilla de acero	Ø	0,8	
Resistencia admisible de la barra de acero	Tadm = fub * Ø	Tadm	130,032 kN
	Tadm > T máx.	Revisión	<b>CUMPLE</b>

#### Deslizamiento de la varilla de acero en la lechada

	fc	12	MPa
Adherencia limite acero-lechada	T lim 1	4,54	MPa
Adherencia admisible acero-lechada	Tadm1	2,37	MPa
Longitud minorada del perno	L bm 1	12,6	m
Perímetro nominal del tirante	Pt 1	0,07	m
Resistencia requerida	Rs 1	0,09	MPa
			<b>CUMPLE</b>



**Refuerzo en la cara interna del muro**

Espesor del Muro (t)	5	in	12	cm
Grado del Acero	60000	psi	4200	kg/cm <sup>2</sup>
Grado del Concreto	3000	psi	210	kg/cm <sup>2</sup>

Refuerzo vertical

**Momento Ultimo**

MD	0,94	ton-m
ML	0	ton-m
Momento Ultimo	0,94	ton-m / m
Ø	0,90	

**Momento Nominal de diseño**

$$M_U = \theta \left[ A_s f_y d - \frac{A_s^2 f_y^2}{1.7 f_c' b} \right]$$

Se despeja el acero As

As2	494,12	
As	-29400,00	
c	104622,22	
<b>Sol</b>	<b>55,70</b>	<b>0,56</b>
	<b>3,80</b>	

As	3,80	cm <sup>2</sup> /m
----	------	--------------------

$$A_{s,min} = 0.0018bh$$

Acero Mínimo

As min	2,16	cm <sup>2</sup> /m
As mín. en 2 capas	1,08	cm <sup>2</sup> /m

As a utilizar

As requerido	3,80	cm <sup>2</sup> /m
--------------	------	--------------------

As propuesto

Malla electrosoldada separaciones @ 15 cm  
As 4 cm<sup>2</sup>/m con varilla #3 G60 uniendo la cabeza de los pernos.

**Refuerzo en la cara expuesta del muro**

Espesor del Muro (t)	5	in	12	cm
Grado del Acero	60000	psi	4200	kg/cm <sup>2</sup>
Grado del Concreto	3000	psi	210	kg/cm <sup>2</sup>

Refuerzo vertical

**Momento Ultimo**

MD	0,68	ton-m
ML	0	ton-m
Momento Ultimo	0,68	ton-m / m
Ø	0,90	

**Momento Nominal de diseño**

$$M_U = \theta \left[ A_s f_y d - \frac{A_s^2 f_y^2}{1.7 f_c' b} \right]$$

Se despeja el acero As

As2	494,12	
As	-29400,00	
c	75288,89	
<b>Sol</b>	<b>56,82</b>	<b>0,57</b>
	<b>2,68</b>	

As	2,68	cm <sup>2</sup> /m
----	------	--------------------

$$A_{s\min} = 0.0018bh$$

Acero Mínimo

As mn.	2,16	cm <sup>2</sup> /m
As mn. en 2 capas	1,08	cm <sup>2</sup> /m

As a utilizar

As requerido	2,68	cm <sup>2</sup> /m
--------------	------	--------------------

As propuesto

Malla electrosoldada separaciones @15 cm  
 As 4 cm<sup>2</sup>/m con varilla #3 de G60 uniendo  
 la cabeza de los pernos.

**Anclajes pasivos talud inferior:  
Diseño de anclajes pasivos por tensión.**

Unidad Perno	Longitud UG2	Longitud UG3	Longitud total	qs	Tu1	Esfuerzo	T máx. con FS=2	Valor Comp	FS Real
P1	6,55 m	5,45 m	12,00 m	0,08	237,57	27,57	118,79	86,67	2,7
P2	6,11 m	5,89 m	12,00 m	0,08	242,84	28,18	121,42	86,67	2,8
P3	5,39 m	6,61 m	12,00 m	0,09	251,49	29,18	125,75	86,67	2,9
P4	5,19 m	6,82 m	12,00 m	0,09	253,93	29,47	126,97	86,67	2,9
Promedio				0,09	Promedio	28,60			

**Tracción de servicio de perno**

Factor de expansión de bulbo de inyección		a	1	
Diámetro nominal		Dn	3	in
Diámetro de perforación	$Ds = Dn \times a$	Dp	0,0762	m
Separación horizontal de anclaje		Sh	1,5	m
Factor de Seguridad		FS	2	
Capacidad de fricción última del terreno		qs	0,09	MPa
Longitud perno		Lb1	12	m
Tracción límite del perno		Tu1	246,46	KN
	$T = \frac{a * Dp * qs * \pi * Lb}{FS}$			
Tracción de Servicio del perno		Tmax1	123,23	KN

**Tensión admisible del acero del perno**

Varilla N°	7			
Límite elástico del acero de la barra		fy	420	MPa
Diámetro nominal de la barra de acero		Ds	22,22	mm
Área nominal de la barra de acero		As	3,87	cm <sup>2</sup>
Resistencia última de la varilla de acero	$fub = fy * As$	fub	162,54	kN
Factor de reducción de la resistencia de la varilla de acero		Ø	0,8	
Resistencia admisible de la barra de acero	$Tadm = fub * \text{Ø}$	Tadm	130,032	kN
	$Tadm > T \text{ máx.}$	Revisión	<b>CUMPLE</b>	

**Deslizamiento de la varilla de acero en la lechada**

		fc	12	MPa
Adherencia limite acero-lechada		T lim 1	4,54	MPa
Adherencia admisible acero-lechada		Tadm1	2,37	MPa
Longitud minorada del perno		Lbm 1	8,4	m
Perímetro nominal del tirante		Pt 1	0,07	m
Resistencia requerida		Rs 1	0,21	MPa
			<b>CUMPLE</b>	



**Refuerzo en la cara interna del muro**

Espesor del Muro (t)	5	in	12	cm
Grado del Acero	60000	psi	4200	kg/cm <sup>2</sup>
Grado del Concreto	3000	psi	210	kg/cm <sup>2</sup>

Refuerzo vertical

**Momento Ultimo**

MD	0,94	ton-m
ML	0	ton-m
Momento Ultimo	0,94	ton-m / m
phi	0,90	

**Momento Nominal de diseño**

$$M_U = \phi \left[ A_s f_y d - \frac{A_s^2 f_y^2}{1.7 f_c b} \right]$$

Se despeja el acero As

As2	494,12	
As	-29400,00	
c	104622,22	
<b>Sol</b>	<b>55,70</b>	<b>0,56</b>
	<b>3,80</b>	

As	3,80	cm <sup>2</sup> /m
----	------	--------------------

$$A_{s,min} = 0.0018bh$$

Acero Mínimo

As min	2,16	cm <sup>2</sup> /m
As mín. en 2 capas	1,08	cm <sup>2</sup> /m

As a utilizar

As requerido	3,80	cm <sup>2</sup> /m
--------------	------	--------------------

As propuesto

Malla electrosoldada separaciones @ 15 cm  
 As 4 cm<sup>2</sup>/m con varilla #3 de G60 uniendo la cabeza  
 De los pernos.

### Refuerzo en la cara expuesta del muro

Espesor del Muro (t)	5	in	12	cm
Grado del Acero	60000	psi	4200	kg/cm <sup>2</sup>
Grado del Concreto	3000	psi	210	kg/cm <sup>2</sup>

Refuerzo vertical

#### Momento Ultimo

MD	0,68	ton-m
ML	0	ton-m
Momento Ultimo	0,68	ton-m / m
phi	0,90	

#### Momento Nominal de diseño

$$M_U = \theta \left[ A_s f_y d - \frac{A_s^2 f_y^2}{1.7 f_c' b} \right]$$

Se despeja el acero As

As2	494,12	
	-	
	29400,0	
As	0	
	75288,8	
c	9	
<b>Sol</b>	<b>56,82</b>	<b>0,57</b>
	<b>2,68</b>	

As	2,68	cm <sup>2</sup> /m
----	------	--------------------

$$A_{s \min} = 0.0018bh$$

Acero Mínimo

As min	2,16	cm <sup>2</sup> /m
As min en 2 capas	1,08	cm <sup>2</sup> /m

As a utilizar

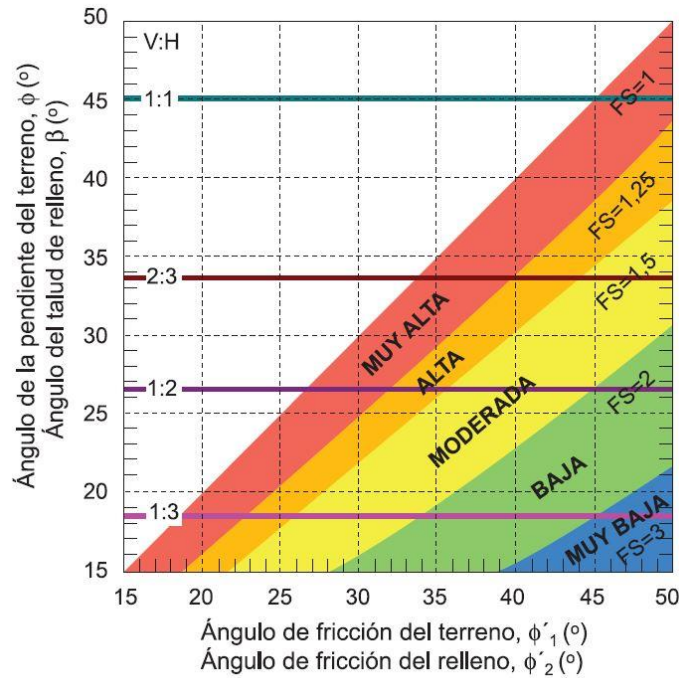
As requerido	2,68	cm <sup>2</sup> /m
--------------	------	--------------------

As propuesto

Malla electrosoldada separaciones @ 8 cm. As 4 cm<sup>2</sup>/m con varilla # 3 de G60 uniendo la cabeza de los pernos.

# Anexos

Anexo 1)



Anexo 1 Relación de ángulo de pendiente del terreno vs ángulo de fricción del terreno para identificación de vulnerabilidad de taludes. Fuente: Metodología Simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes.

Anexo 2)

Clasificación preliminar del territorio frente a potenciales movimientos de ladera				
Presencia de movimientos y tipos de materiales		Pendiente		
		Muy baja (<10%)	Baja-media (10°-20°)	Media-alta (>20°)
Sin movimientos activos o antiguos	Sustrato estable	Estable	Estable	Moderadamente estable
	Depósitos superficiales no susceptibles		Generalmente estable	
Con movimientos antiguos	Sustrato estable	Estable	Moderadamente estable	
	Sustrato susceptible	Generalmente estable	Moderadamente inestable	
	Depósitos superficiales susceptibles		Moderadamente inestable	Inestable
Con movimientos actuales o activos		Inestable	Inestable	

Basado en Nilsen, 1979; en Varnes, 1984.

Anexo 2 Clasificación preliminar de territorio frente a movimientos. Fuente: Ingeniería Geológica. L. Vallejos.

Anexo 3)

**Tabla 3. Factores de seguridad para el diseño de taludes permanentes y análisis de laderas**

Condición de análisis	Riesgo de pérdida de vidas Riesgo de daños económicos y ambientales	Bajo	Medio	Alto
• Estática	Bajo	1,20	1,30	1,40
	Medio	1,30	1,40	1,50
	Alto	1,40	1,50	1,50
• Seudoestática: Coeficiente pseudoestático según el Artículo 2.5, Tabla 10	Bajo	>1,00	>1,00	1,05
	Medio	>1,00	1,05	1,10
	Alto	1,05	1,10	1,10

Anexo 3 Factores de seguridad para el diseño y análisis de taludes. Fuente: Código Geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica.

Anexo 4)

**Tabla 13. Clases de instrumentación en taludes y laderas**

Nivel de riesgo	Complejidad geotécnica		
	Baja	Media	Alta
Bajo	A	A	B
Medio	B	B	C
Alto	C	C	C

e. Los requisitos definidos en la Tabla 13, para cada una de las clases de instrumentación, son los siguientes:

- i. **Clase A:** La instrumentación se considera opcional, debe utilizarse cuando el profesional responsable lo considere necesario.
- ii. **Clase B:** Es recomendable la instalación de instrumentos que aporten datos relevantes y que permitan garantizar y verificar la estabilidad o inestabilidad de los taludes y laderas.
- iii. **Clase C:** La instrumentación en los taludes y laderas se considera obligatoria. Igualmente se considera obligatoria la instrumentación en las presas.

Anexo 4 Clases de instrumentación para laderas. Fuente: Código Geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica.

# Referencias

- Comisión Código de Cimentaciones de Costa Rica. (2012). *Código de Cimentaciones de Costa Rica*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica
- Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. (2011). *Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR 2010)*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.
- Comité técnico del Código de cimentaciones de Costa Rica. (2016). *Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica.
- Luis L. Gonzales de Vallejo, M. F. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Richard E Goodman, (1989). *“Introduction to Rock Mechanics”*. (Second edition), University of California at Berkeley.
- Lynn M. Highland y Peter Bobrowsky (2008). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes*. Servicio Geológico de los EE. UU., Reston, Virginia.
- Ing. Alicia Alpízar Barquero (2012) *Metodología de análisis de estabilidad de taludes para Proyectos viales*. XI Congreso Nacional de Geotecnia, Congeo. San José Costa Rica.
- Braja M. Das, Taylor & Francis. (2007) *Advanced Soils Mechanics*. Third edition. Madison Ave, New York, NY 10016, USA.
- Jaime Suarez. (1995). *Comportamiento Sísmico de los Taludes*. Capítulo 7, *Análisis Geotécnico*.
- Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras y Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y Subsuelo (AETESS). (2001). *Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera*. Madrid.
- Gastón Laporte Molina & Jorge Arturo Herrera. (2009). *Evaluación Geológica y Geotécnica zonas inestables 21+780*. San José, Costa Rica.
- Álvaro Ulloa Calderón Y William Vargas Monge. (2007) *Vulnerabilidad Geotécnica, Metodología Simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carretera de montaña de Costa Rica*. LanameUCR. Universidad de Costa Rica.
- Mariela del Carmen Ocampo Araya. (2016). *Sistema de classificação geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no índice de qualidade hsqi: Aplicação na Costa Rica*. Faculdade de tecnologia Universidade de Brasília. Brasil.
- Murciah H.F, Borrero C.A, Pardo N., Alvarado G.E, Arnosio M. & Scolamacchia T. (2013). *Depósitos volcániclos: términos y conceptos para una clasificación en español*. - Revista Geológica de América Central, 48: 15-39.
- Carlos Roberto Sáenz González. (2017). *Propuesta de instrumentación de sitio presa del Proyecto Hidroeléctrico: El Diquís*. Instituto Tecnológico de Costa Rica: Escuela de Ingeniería en Construcción.

Pedro Ramírez Oyanguren y Leandro Alejano  
Monge. (2004). *Mecánica de Rocas,  
Fundamentos e Ingeniería de taludes*.  
Universidad Politécnica de Madrid.

Comisión Redactora del CR-2010. Lanamme UCR  
(2009). Manual de especificaciones  
generales para la construcción de  
carreteras, caminos y puentes. CR-2010.  
Universidad de Costa Rica.