



## Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: EIC-Lanamme-INF-0493-2023

**Informe de evaluación de los deslizamientos de mayor  
magnitud identificados en el tramo entre los kilómetros 65 y  
75 de la Ruta Nacional No. 1**



Preparado por:

Ing. Laura Solano Matamoros  
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica  
Mayo, 2023



<b>1. Informe</b> EIC-Lanamme-INF-0493-2023	<b>2. Copia No.</b> 1	
<b>3. Título y subtítulo:</b> Informe de evaluación de los deslizamientos de mayor magnitud identificados en el tramo entre los kilómetros 65 y 75 de la Ruta Nacional No. 1	<b>4. Fecha del Informe</b> 2 mayo 2023	
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>6. Notas complementarias</b> Ninguna		
<b>7. Resumen</b> <i>Como parte de las labores que le otorga la ley 8114 al LanammeUCR, el presente informe muestra los resultados del análisis preliminar de estabilidad de los taludes resultantes luego de ocurridos los deslizamientos ocurridos entre los kilómetros 65 y 75 de la Ruta Nacional No. 1. El primer sitio de análisis corresponde al km 66 punto donde ocurrió el deslizamiento en Cambronero el pasado mes de setiembre de 2022. Estos análisis tienen la finalidad de verificar de manera preliminar la posible afectación a la Ruta Nacional dada la condición post deslizamiento del sitio. A partir de los resultados preliminares obtenidos en los análisis realizados a los modelos construidos desde el levantamiento de la zona con un vehículo aéreo no tripulado realizado en octubre 2022 se destaca que, para las propiedades del material utilizado y las condiciones evaluadas, los resultados de los factores de seguridad no cumplen con lo recomendado en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica, especialmente para la condición en la que el terreno se encuentra completamente saturado. Se realizó un nuevo levantamiento de la zona en marzo 2023, abarcando un área mayor y cuyo objetivo es dar una perspectiva global de la zona de estudio, con la cual se puedan identificar condiciones desfavorables para la estabilidad de los taludes, así como evidencias de movimiento que no sean posibles de observar desde el nivel de la carretera. Es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos ya que la información disponible, exploración geotécnica de la zona y el estudio completo correspondiente, son responsabilidad de la Administración. Sin embargo, este constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones que pueden sufrir los taludes y la estructura del pavimento. Finalmente, se resalta que, durante las visitas realizadas, se observaron que los taludes existentes carecen de sistemas adecuados para el control de la escorrentía superficial.</i>		
<b>8. Palabras clave</b> Taludes, modelo de elevación digital, análisis de estabilidad, equilibrio límite, drenaje natural, escorrentía superficial	<b>9. Nivel de seguridad:</b> -	<b>10. Núm. de páginas</b> 44
<b>11. Preparado por:</b> Ing. Laura Solano Matamoros. Programa Ingeniería Geotécnica		Dr. Paulo Ruiz Cubillo Geólogo UGERVN-PITRA
<b>12. Revisado por:</b> Lic. Nidia Segura Unidad de Asesoría Legal		Lic. Giovanni Sancho Coordinador Unidad de Asesoría Legal
<b>13. Revisado y aprobado por:</b> Ana Lorena Monge Sandí, MSc. Coordinadora Programa Ingeniería Geotécnica		



## Tabla de contenido

I.	Introducción .....	8
II.	Descripción general del sitio .....	9
II.1	Geología local sector Cambronero.....	10
II.2	Formación Punta Carballo (Mioceno Inferior-Mioceno Medio) .....	11
II.2.1	Miembro Mata de Limón.....	12
II.2.2	Miembro Roca Carballo.....	12
II.3	Grupo Aguacate (Mioceno – Plioceno) .....	12
II.3.1	Lavas Aguacate.....	13
II.3.2	Ignimbrita ácida con biotita y líticos, unidad Alto Palomo .....	13
II.3.3	Fallas y alineamientos tectónicos.....	14
II.4	Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de San Ramón.....	14
II.5	Condición del sitio luego del deslizamiento .....	17
III.	Descripción del trabajo realizado .....	18
III.1	Ensayos de laboratorio.....	18
III.2	Ensayos de clasificación .....	19
III.2.1	ASTM D2216 Procedimiento para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas	19
III.2.2	ASTM D7263 Método de ensayo para la determinación en laboratorio de la densidad de especímenes de suelo.....	19
III.2.3	ASTM D854 Procedimiento para determinar la gravedad específica del suelo.....	19
III.2.4	ASTM D4318 Procedimiento para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo .....	20
III.2.5	ASTM D1140 Métodos de ensayo estándar para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz 75 µm (Nº 200) en suelos mediante lavado .....	20
III.3	Ensayos de resistencia .....	21
III.3.1	ASTM D2166 Ensayo de compresión inconfiada de suelos cohesivos .....	21
III.3.2	ASTM D2938 Resistencia a la compresión inconfiada de Núcleos de Roca.....	21
III.3.3	ASTM D6528 Método estándar de ensayo de corte directo simple para suelos finos consolidado no drenado .....	22
III.4	Modelo geológico – geotécnico del sitio .....	22
III.5	Modelo de elevación digital (MED).....	25
IV.	Comprobación de estabilidad de los taludes utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL). 27	
IV.1	Resultado de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) del sitio 1 ubicado en el km 66 de la Ruta Nacional No. 1 .....	29
IV.2	Resultado de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) del sitio 1 suponiendo un perfil del suelo estratificado.....	32

EIC-Lanamme-INF-0493-2023	Mayo de 2023	Página 3 de 44
---------------------------	--------------	----------------



IV.3 Resultado de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) del sitio 2 ubicado aproximadamente en el km 68 de la Ruta Nacional 1 ..... 36

V. Condición actual ..... 39

VI. Comentarios finales ..... 43

VII. Referencias ..... 44



# Figuras

Figura 1, Afectación en el derecho de vía producto de los deslizamientos en RN1..... 8

Figura 2. Ubicación de la zona de estudio ..... 10

Figura 3. Mapa geológico del sector de Cambronero modificado de de Žáček et al., 2012 donde se muestran las formaciones geológicas, tipos de alteración y fallas tectónicas cerca de la zona del deslizamiento del 17 de setiembre del 2022..... 11

Figura 4. Fotografía oblicua capturada con un vehículo aéreo no tripulado del sector medio de la zona deslizada el 17 de setiembre del 2022, donde se pueden observar bloques de tamaño métrico con una textura de rompecabezas y la salida de agua de una naciente que quedó expuesta ..... 14

Figura 5. Mapa de amenazas geológicas del cantón de San Ramón ..... 16

Figura 6. Condición del sitio de estudio al momento del levantamiento en la Ruta Nacional No. 1. a) sitio ubicado en el estacionamiento 66+200, b) sitio ubicado en el estacionamiento 70+000 ..... 17

Figura 7. Curva granulométrica, muestra M-1856-2022 ..... 20

Figura 8. Curva granulométrica, muestra M-1857-2022 ..... 21

Figura 9. Esfuerzo cortante según esfuerzo normal aplicado..... 22

Figura 10. Conformación de la estratigrafía del sitio 1 ..... 23

Figura 11. Conformación de la estratigrafía del sitio 2 ..... 24

Figura 12. Nube de puntos obtenida de la zona de estudio del punto 1 km 66 Ruta Nacional No. 1 como resultado del levantamiento realizado con el VANT ..... 26

Figura 13. MED y curvas de nivel de los sitios de estudio 1 y 2 respectivamente de la Ruta Nacional No. 1 ..... 27

Figura 14. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición seca y estática obtenidos con la metodología de Bishop ..... 29

Figura 15. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición seca y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop..... 30

Figura 16. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición saturada y estática obtenidos con la metodología de Bishop..... 31

Figura 17. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición saturada y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop..... 31

Figura 18. Perfil estratificado del sitio de análisis 1 ..... 33

Figura 19. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición seca y estática obtenidos con la metodología de Bishop suponiendo un perfil estratificado ..... 34

Figura 20. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición seca y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop suponiendo un perfil estratificado..... 34

Figura 21. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición saturada y estática obtenidos con la metodología de Bishop suponiendo un perfil estratificado..... 35

Figura 22. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición saturada y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop suponiendo un perfil estratificado..... 35

Figura 23. Mapa de contornos de Factores de seguridad para el sitio 2 en condición seca y estática obtenidos con la metodología de Bishop ..... 37



Figura 24. Mapa de contornos de Factores de seguridad para el sitio 2 en condición seca y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop..... 37

Figura 25. Mapa de contornos de Factores de seguridad para el sitio 2 en condición saturado y estática obtenidos con la metodología de Bishop..... 38

Figura 26. Mapa de contornos de Factores de seguridad para el sitio 2 en condición saturado y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop..... 39

Figura 27. Ortofotografía de la condición actual del sitio de estudio en Cambronero sobre Ruta Nacional No. 1 ..... 40

Figura 28. Evidencia de deslizamiento de material en los taludes de Ruta Nacional No. 1 ..... 41

Figura 29. Evidencia de movimiento en el terreno cercano al deslizamiento del sitio 1 ..... 41

Figura 30. Recorrido de drenaje natural alineado con lagunas en la corona del talud..... 42

Figura 31. Recorrido de drenaje natural ramificado cercano al deslizamiento del sitio 1 ..... 43



## Tablas

Tabla 1. Contenido de humedad de suelos y rocas, muestras indicadas..... 19

Tabla 2. Densidad de especímenes de suelo, muestra M-1858-2022 ..... 19

Tabla 3. Gravedad específica suelos, muestra M-1856-2022 ..... 19

Tabla 4. Gravedad específica suelos, muestra M-1857-2022 ..... 19

Tabla 5. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, muestra M-1856-2022..... 20

Tabla 6. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, muestra M-1857-2022..... 20

Tabla 7. Resultados del ensayo compresión inconfínada de suelos cohesivos ..... 21

Tabla 8. Resultados del ensayo de compresión inconfínada de roca, muestra M-1859-2022(1) .... 21

Tabla 9. Resultados del ensayo de compresión inconfínada de roca, muestra M-1859-2022(2) .... 21

Tabla 10. Resultados del ensayo de compresión inconfínada de roca, muestra M-1859-2022(3) .. 22

Tabla 11. Resultados consolidación corte directo, muestras indicadas ..... 22

Tabla 12. Resultados corte directo..... 22

Tabla 13. Parámetros de resistencia a utilizar en la capa de suelo y roca..... 25

Tabla 14. Resumen de resultados del Factor de seguridad obtenido para las diferentes condiciones evaluadas en el deslizamiento del sitio 2 ..... 32

Tabla 15. Resumen de resultados del Factor de seguridad obtenido para las diferentes condiciones evaluadas en el deslizamiento del sitio 1 suponiendo un perfil estratificado..... 36

Tabla 16. Resumen de resultados del Factor de seguridad obtenido para las diferentes condiciones evaluadas en el deslizamiento del sitio 2 ..... 39

Tabla 17. Coordenadas de inicio y final del levantamiento de la condición actual de la zona de estudio  
40

## Informe de evaluación de los deslizamientos de mayor magnitud identificados en el tramo entre los kilómetros 65 y 75 de la Ruta Nacional No. 1

### I. Introducción

Dadas las condiciones actuales de la Ruta Nacional No. 1 (RN1), la cual durante el recorrido realizado el 05 de octubre de 2022 fue posible identificar varios puntos a lo largo de la ruta en los que se observan evidencias de movimiento de masas de suelo, ya sea en el talud de corte sobre el derecho de vía, o en el talud inferior a la carretera. Incluso en algunos puntos específicos, es posible identificar material caído al pie del talud que obstruye parcialmente el paso de los vehículos y en otros casos, deslizamientos ocasionan la pérdida parcial de un carril sobre la vía, ver Figura 1.



Figura 1, Afectación en el derecho de vía producto de los deslizamientos en RN1  
a) sitio ubicado en el estacionamiento 66+200, b) sitio ubicado en el estacionamiento 70+000

En el presente documento se muestran los resultados del análisis de estabilidad de dos sitios de la ruta racional 1 que, en el momento de la visita de campo fueron identificadas evidencia de deslizamientos del terreno que como consecuencia movilizaron una cantidad importante de material. Estos puntos se ubican específicamente entre el km 66+200 y 70+000 de la Ruta Nacional No. 1, tanto en el talud de corte sobre el derecho de vía, como en el talud inferior a la carretera. Este último abraza parte de la carretera, limitando a un solo carril la vía por el sector.

Adicionalmente, se realiza una visita por parte del Programa de Ingeniería Geotécnica (PIG) en conjunto con el laboratorio de geotecnia para realizar un diagnóstico del sitio y toma de muestras para la caracterización geomecánica del material que conforma los sitios. Es importante tener en consideración que: la caracterización geomecánica realizada es general y preliminar, y las muestras fueron tomadas en puntos específicos y los resultados se extrapolan a la generalidad del sitio para los análisis realizados. Por lo tanto, los resultados mostrados en el presente informe no son definitivos ni tienen la capacidad de sustituir un análisis posterior mayor y exhaustivo, contando con resultados de una campaña de exploración geotécnica de mayor extensión, para así poder contar con los insumos necesarios y suficientes para determinar con mayor precisión la condición de estabilidad de la zona y el diseño de obras de estabilización, en caso de ser requerido. Por lo que este análisis se constituye como insumo y una guía que puede ser tomada en consideración y referencia para llevar a cabo análisis más exhaustivos.

EIC-Lanamme-INF-0493-2023	Mayo de 2023	Página 8 de 44
---------------------------	--------------	----------------



A las muestras tomadas en el sitio se les realizan los ensayos de laboratorio, según la siguiente descripción:

- Procedimiento para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas (ASTM D2216)
- Procedimiento para determinar la gravedad específica del suelo mediante un picnómetro con agua (ASTM D854)
- Procedimiento para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo (ASTM D4318)
- Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos (ASTM D 2166)
- Prácticas normalizadas para la preparación de especímenes de núcleos de roca cilíndricos y determinación de las tolerancias dimensionales y de forma (ASTM D4543)
- Método estándar de ensayo de corte directo simple para suelos finos consolidado no drenado (ASTM D6528)
- Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (utilizando tamices) (ASTM D6913)
- Método de ensayo normalizado para la resistencia en compresión y módulo de elasticidad de especímenes de núcleos de roca intactos bajo estados de esfuerzo y temperatura variables (método C) (ASTM D7012)
- Método de ensayo para la determinación en laboratorio de la densidad (peso unitario) de especímenes de suelo (método A) (ASTM D7263)

Con los resultados de estos ensayos, es posible clasificar el material y asignarle propiedades geomecánicas, para así generar un modelo geológico – geotécnico preliminar que permita el análisis inicial de los sitios de interés.

## **II. Descripción general del sitio**

El sitio de análisis se ubica en el distrito de Santiago del cantón de San Ramón de la provincia de Alajuela, sobre la Ruta Nacional N°1. En la Figura 2, se determina la zona de estudio, en la cual se ubican los deslizamientos analizados. Además, como referencia se señala la ubicación de la ciudad de San Ramón.



Figura 2. Ubicación de la zona de estudio

A continuación, se incluye una descripción geológica de la zona de estudio con información relevante para ser considerada en los análisis de estabilidad, elaborada por el geólogo de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional del PITRA del LanammeUCR (UGERVN), Dr. Paul Ruiz Cubillo.

## II.1 Geología local sector Cambronero

A continuación, se describen las formaciones geológicas que están en las cercanías del sector de Cambronero y que atraviesa la Ruta Nacional No. 1, según la información del mapa geológico de la Hoja Miramar escala 1:50 000 de Žáček et al (2010) y su descripción en Žáček et al (2011). En general en esta zona afloran rocas de la Formación Punta Carballo, del Grupo Aguacate, depósitos de ignimbrita y depósitos recientes de deslizamientos, todos estos materiales pueden presentar alteraciones hidrotermales de varios tipos y estar atravesadas por varias fallas tectónicas con rumbos preferenciales NW-SE (Figura 3).

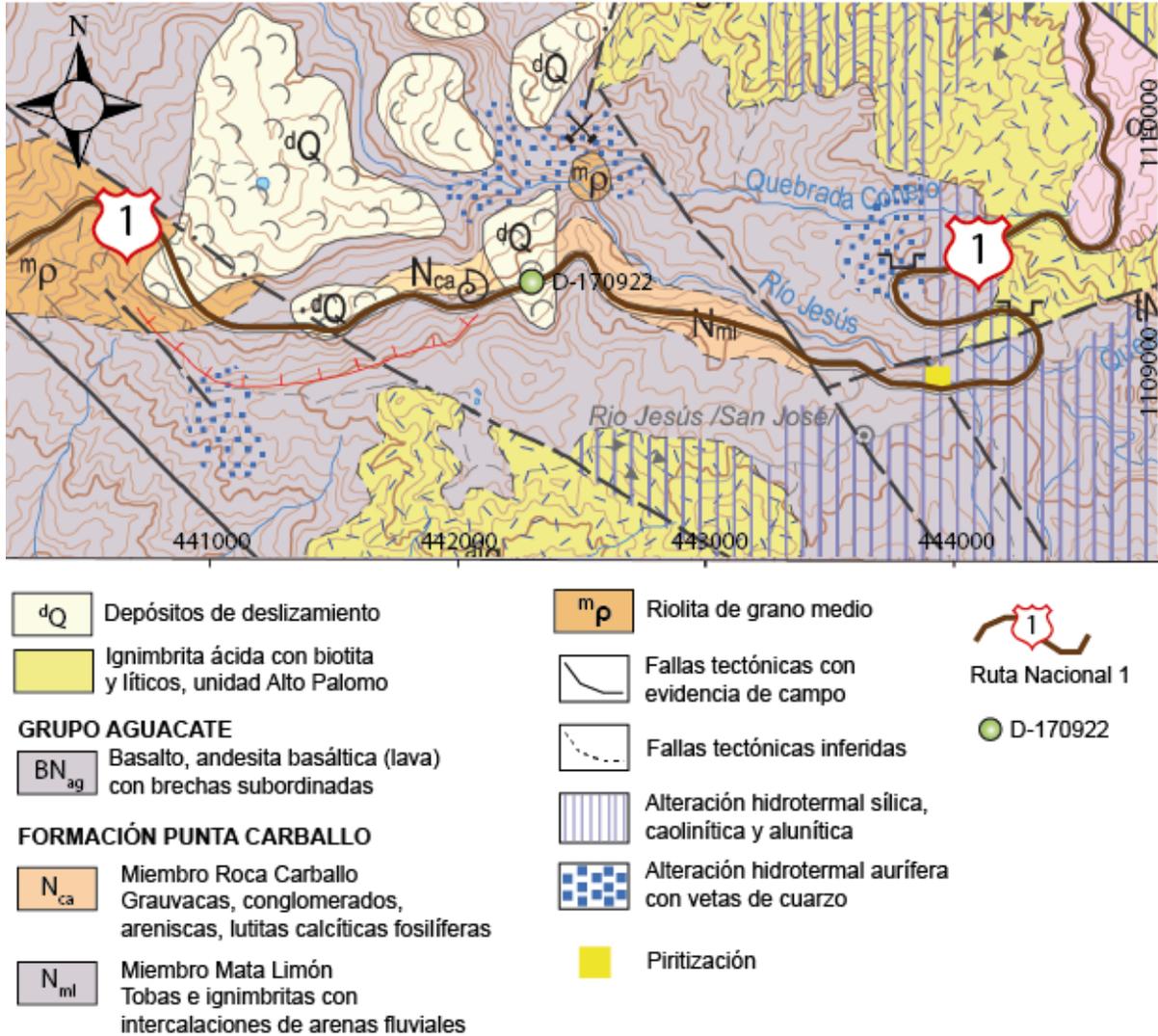


Figura 3. Mapa geológico del sector de Cambronero modificado de de Žáček et al., 2012 donde se muestran las formaciones geológicas, tipos de alteración y fallas tectónicas cerca de la zona del deslizamiento del 17 de setiembre del 2022

## II.2 Formación Punta Carballo (Mioceno Inferior-Mioceno Medio)

Esta formación está constituida por dos miembros principales, Mata de Limón y Roca Carballo. En los alrededores del poblado de Río Jesús, las rocas sedimentarias del miembro Mata de Limón, se encuentran dentro de la secuencia del Grupo Aguacate. Mientras que los materiales del Miembro Roca Carballo afloran en las inmediaciones de la Ruta 1 cerca de donde ocurrió el deslizamiento del 17 de setiembre del 2022.



### **II.2.1 Miembro Mata de Limón**

La mayor extensión de estas rocas se encuentra al sur de la hoja Miramar en la zona de Angostura, Guadalupe y fincas adyacentes, aflorando en los cortes de la Carretera Interamericana (Figura 3) y en otras carreteras, también afloran cerca del pueblo Río Jesús. Los depósitos del Miembro Mata de Limón provienen de ambientes continentales y están compuestos en su mayoría por material volcánico como tobas, ignimbritas y aglomerados intercalados con areniscas y limolitas, hasta gravas lentiformes de origen fluvial. En su mayoría tienen color café oscuro o café-violeta. A diferencia del Miembro Roca Carballo, no son calcáreos ni fosilíferos. Las capas individuales tienen un espesor de 0,2-1 m. Puede tener gradación normal, de areniscas hacia arcillas. En lentes de depósitos fluviales (tamaño 3-10 m) pueden observarse también areniscas hasta conglomerados con estratificación cruzada. Los cantos de los conglomerados son bastante ovalados, de rocas volcánicas (andesitas) y también de sedimentos (grauvacas, limolitas, lutitas y cuarzos) y normalmente con tamaños de hasta 4 cm (raramente hasta 20 cm).

### **II.2.2 Miembro Roca Carballo**

Los depósitos del Miembro Roca Carballo son sedimentos calcáreos de mar somero, que transgresivamente se depositaron sobre el piso del miembro Mata de Limón. Está compuesto de areniscas y limolitas calcáreas, de color verde-gris y es significativamente fosilífero. La parte inferior de la secuencia está formada por conglomerados de granulometría gruesa que se erosionan en formas esféricas de gran tamaño (decimétricos a métricos). El espesor de las capas de los conglomerados es de 4 a 5 m y el material está compuesto de clastos volcánicos bien redondeados y de fragmentos de conchas gruesas (gasterópodos, bivalvos). Presenta estratificación interna y ritmos más delgados de tamaños desde 10 a 15 cm. El análisis del material que conforma el conglomerado mostró, que las composiciones de estos son únicamente de andesitas y andesitas basálticas, siempre con una estructura ofítica; esto demuestra la existencia de un vulcanismo andesítico antes de la deposición de las capas sedimentarias del Mioceno de la Formación Punta Carballo. En la Carretera Interamericana a la altura del pueblo de Río Jesús (Figura 3), en un salto de agua, se localiza de forma aislada un área pequeña de sedimentos. En este afloramiento (de aproximadamente 20 m de altura) se observa, que las andesitas están tectónicamente separadas de la secuencia de limolitas y areniscas calcáreas.

### **II.3 Grupo Aguacate (Mioceno – Plioceno)**

El Grupo Aguacate es parte del antiguo arco volcánico compuesto principalmente por lavas basálticas hasta basalto-andesíticas, rocas piroclásticas, brechas y sedimentos vulcanoclásticos subordinados. Está cortado por intrusiones de composición variada, como: cuerpos subvolcánicos de riolitas, dacitas, andesitas, basaltos y otras intrusiones más profundas de dioritas hasta gabros. Este grupo se caracteriza por una intensa alteración hidrotermal que se manifiesta de diferentes tipos. En la mayoría de los casos están relacionados a zonas de fallas o intrusiones, que dan origen a una alteración hidrotermal de carácter regional. Esta última se caracteriza por la variedad multicolor que obtienen las rocas alteradas y por la presencia de vetillas y vetas de cuarzo. En el área de la hoja Miramar, el Grupo Aguacate sobreyace la formación sedimentaria Punta Carballo. Su espesor ha sido estimado por varios autores; Madrigal (1980) lo estimó en 450 m, Kussmaul (1987) en 1 100 m y Denyer & Arias (1991) reconocen que el espesor a veces puede llegar hasta 3000 m.

EIC-Lanamme-INF-0493-2023	Mayo de 2023	Página 12 de 44
---------------------------	--------------	-----------------



### **II.3.1 Lavas Aguacate**

Las rocas que predominan en este grupo son lavas de composición basáltica hasta andesita-basáltica. Petrográficamente son rocas masivas, de leve hasta moderada texturas porfídica (algunas lavas pueden tener amígdalas), color gris oscuro a gris negro, con fenocristales de plagioclasa de hasta 5 mm de longitud. Las lavas meteorizadas o alteradas pueden tener un color de gris claro a rojizo.

### **II.3.2 Ignimbrita ácida con biotita y líticos, unidad Alto Palomo**

Hay varios afloramientos cerca de la Ruta Nacional No. 1, entre las localidades de Río Jesús y Constancia. La roca es gris hasta rosa, muy bien soldada, muy vidriosa con fragmentos líticos blancuzcos y angulares de varios centímetros, y abundantes fiammes de color negro. No se puede descartar la posibilidad de que estas rocas sean más antiguas, principalmente por el fuerte hidrotermalismo que tipifica a las rocas del Grupo Aguacate.

Depósitos de deslizamientos

En general los depósitos de deslizamientos están conformados por material clástico (clastos y bloques de hasta varios metros de diámetro) de rocas volcánicas principalmente andesitas y dacitas, están caóticamente mezcladas con una matriz arcillosa o de fragmentos líticos y por lo general saturados de agua. Sus espesores pueden alcanzar hasta varias decenas de metros. Hay varios lugares en la zona de estudio donde se encuentran estos materiales todos hacia el sector del río Jesús.

En el sitio donde ocurrió el deslizamiento del 17 de setiembre del 2022 coincide con un afloramiento de este tipo de depósitos según el mapa geológico con de la Hoja Miramar escala 1:50 000. En este caso específico el área expuesta por el deslizamiento deja ver bloques de rocas volcánicas de tipo andesitas, en medio de una matriz arcillosa y suelos orgánicos. Algunos de los bloques métricos presentan textura de tipo rompecabezas que es típica de depósitos de grandes deslizamientos. Además, por la remoción de materiales en ese sector quedó expuesto nivel freático por el que ahora sale el agua (Figura 4).



Figura 4. Fotografía oblicua capturada con un vehículo aéreo no tripulado del sector medio de la zona deslizada el 17 de setiembre del 2022, donde se pueden observar bloques de tamaño métrico con una textura de rompecabezas y la salida de agua de una naciente que quedó expuesta

### II.3.3 Fallas y alineamientos tectónicos

Las fallas tectónicas observadas e inferidas de la zona de estudio presentan un rumbo preferencial NW-SE y tienen movimiento de rumbo de tipo dextral, este rumbo es recurrente en la zona debido a los esfuerzos tectónicos regionales. Es frecuente que las zonas que atraviesan las fallas presenten alteración de los suelos y las rocas que están cerca de estas estructuras tectónicas, en algunos casos se puede presentar alteración hidrotermal y piritización (acumulación de la mineral pirita que puede generar acidificación de aguas superficiales) vetas, alteración hidrotermal aurífera y silíceas.

### II.4 Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de San Ramón

El cantón de San Ramón posee una red fluvial bien definida, esto se puede observar en la Figura 5 la misma cuenta con un grupo de quebradas y ríos que se consideran puntos focales de amenazas hidrometeorológicas del cantón.

En la zona se ubican fuentes sísmicas con registros de actividad importante, en el mapa de la Figura 5, es posible identificar zonas de amplificación de la intensidad sísmica debido a el tipo de suelos, deslizamientos de diversas magnitudes, fallas en el terreno y deslizamientos.



Cambronero se ubica específicamente en el distrito de Santiago, donde por sus características topográficas y geológicas existe la influencia deslizamientos y se encuentran fallas y calderas volcánicas que se relacionan con la presencia de ceniza volcánica en la composición de los suelos.

En cuanto a las amenazas puntuales que afectan la zona en estudio, en la Figura 5 se presenta el mapa de amenazas y peligros confeccionado por la Comisión Nacional de Emergencias para el Cantón de San Ramón, con un acercamiento a la zona donde se ubica el sitio de análisis. En esta figura se puede observar que el mayor potencial de amenaza radica en la presencia de fallas tectónicas del cuaternario, áreas con potencial de inundación, presencia de ríos y quebradas, fallas paleo tectónicas. El sitio de estudio se encuentra en un punto crítico donde se da la confluencia de distintas amenazas y que, por la cercanía de las fallas a la red vial y poblados de la zona, se cataloga como una zona de atención ante amenazas y peligros naturales.

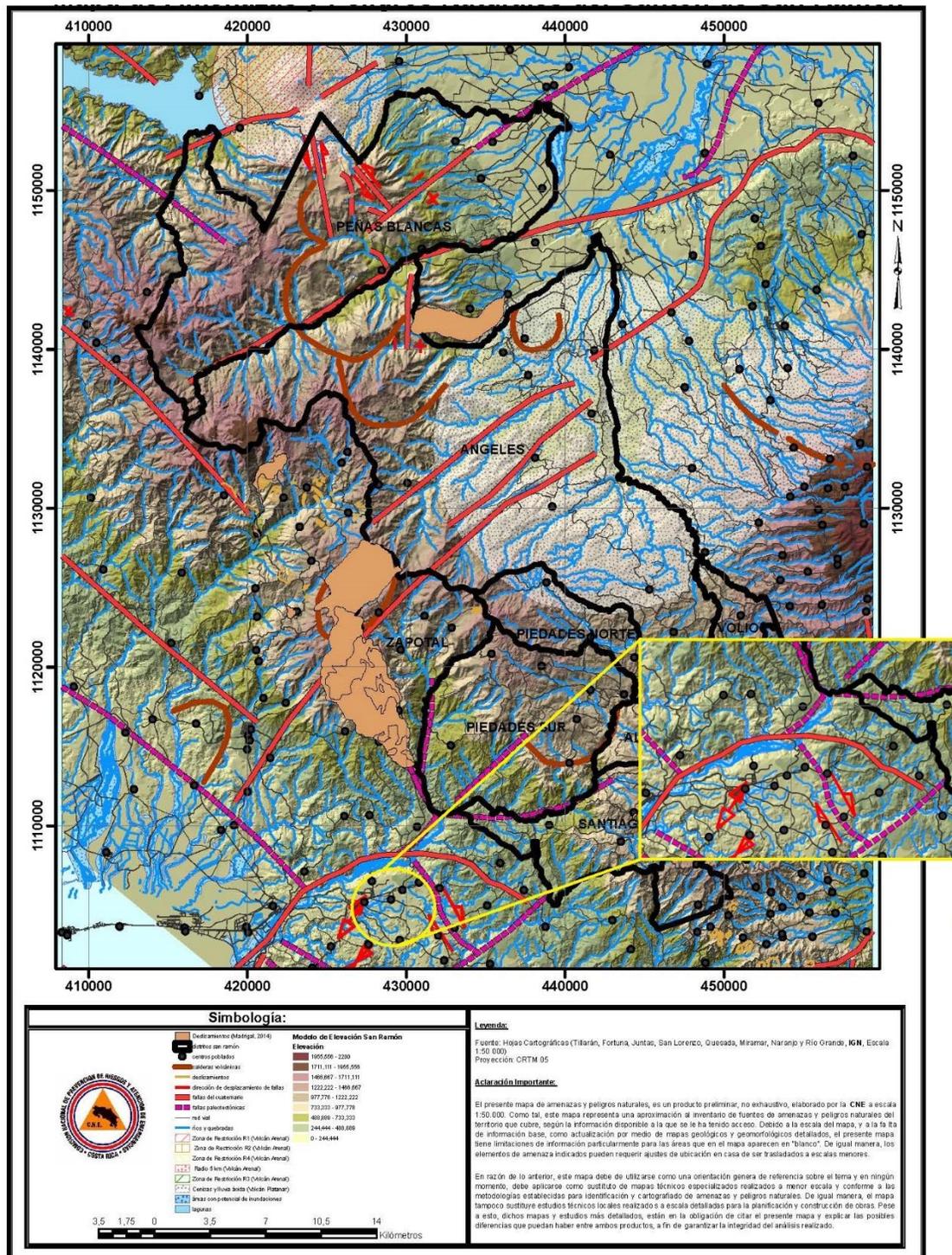


Figura 5. Mapa de amenazas geológicas del cantón de San Ramón

## II.5 Condición del sitio luego del deslizamiento

Es importante tomar en consideración que esta vía es una ruta nacional de alto tránsito de vehículos de transporte de materia de importación y exportación, por lo que su buen funcionamiento y seguridad a los usuarios son aspectos fundamentales para su desempeño.

Al momento de la visita del 05 de octubre del 2022, el sitio se encontró con vegetación autóctona en los taludes tanto superior a la carretera como el talud inferior. La zona se caracteriza por ser muy húmeda y con alta frecuencia de precipitaciones, lo cual aumenta la probabilidad de que se presenten deslizamientos debido a la saturación del medio. De manera general a lo largo de la carretera es posible identificar deslizamientos de diferentes magnitudes, así como zonas con hundimientos que van desde centímetros hasta metros. Esto es un indicio de que, de manera general la zona está conformada por materiales que bajo ciertas circunstancias se comporten de manera desfavorable aunado a que con la sobre carga vehicular y la saturación del suelo en época lluviosa se ven afectados presentando inestabilidades y pérdidas de secciones de vía de una magnitud tal que afectan el flujo vehicular en la carretera.

Además, durante esta visita fue posible identificar personal trabajando en la estabilización y rehabilitación de secciones de la vía que fueron inhabilitadas por deslizamientos en la carretera. Sin embargo, en los sitios que se están analizando en este informe, no se observó la presencia de personal atendiendo el sitio, como lo muestra la Figura 6.



Figura 6. Condición del sitio de estudio al momento del levantamiento en la Ruta Nacional No. 1. a) sitio ubicado en el estacionamiento 66+200, b) sitio ubicado en el estacionamiento 70+000

Para ambos puntos de interés la cara del talud resultante luego de los deslizamientos permite conocer de manera superficial el terreno que los conforma, y por lo tanto intuir bajo la inspección visual y el criterio geotécnico posibles conformaciones de los perfiles estratigráficos. Entonces, es posible identificar la presencia de un material granular con cierta cohesión así como también afloramientos de roca.

Es importante mencionar que, durante las visitas realizadas, se observó que existe deficiencia en los sistemas para el control de escorrentía superficial, que no permite la adecuada evacuación de las aguas provenientes de la lluvia, pudiendo eventualmente desencadenar problemas de erosión en los taludes y agravar la situación de estabilidad de los mismos, lo que finalmente sumado a otras



condiciones desfavorables para la estabilidad de los taludes da como resultado deslizamientos como los que se analizan en este documento (ver Figura 6).

### III. Descripción del trabajo realizado

Debido al deslizamiento ocurrido en la zona conocida como Cambronero el pasado 17 de setiembre de 2022, el Programa de Ingeniería Geotécnica del LanammeUCR realiza los análisis preliminares, pertinentes en los sitios específicos que presentan una mayor afectación en la Ruta Nacional No. 1, específicamente en el tramo que va del kilómetro 66+200 AL 70+00 El trabajo tiene como objetivo determinar las propiedades geomecánicas del material característico de la zona de estudio, para realizar los análisis de estabilidad de los sitios en específico.

Para la clasificación del material característico de la zona de estudio, se tomaron cuatro muestras ubicadas cerca de los dos deslizamientos de mayor magnitud identificados en el sector de Cambronero. El primero de los deslizamientos en cuestión corresponde al sitio en el que, el pasado 17 de setiembre de 2022, se reportó la caída de un autobús tras ser impactado por el material movilizado del talud de corte superior a la carretera. El segundo deslizamiento corresponde a uno de mayor antigüedad que, con el paso del tiempo se ha ido extendiendo hacia la carretera, limitando la misma a un solo carril. Las muestras de material para la clasificación fueron tomadas de los siguientes puntos, dados en coordenadas CRTM05.

Tabla 1. Ubicación georreferenciada en coordenadas CRTM-05 de los puntos de muestreo

Coordenada	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
X	442549.19234115916	441895.77735702455	442116.3930515492	440570.02414045564
Y	1109683.0434036597	1109570.1711126517	1109605.6511045634	1109511.1696802175

#### III.1 Ensayos de laboratorio

En el siguiente apartado se muestra un resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las respectivas muestras de material provenientes del sitio de análisis. Los resultados detallados se encuentran en el informe EIC-Lanamme-INF0324-2023.

A continuación, se realiza la descripción de las muestras, para los análisis se debe tener en consideración que las muestras tomadas del estacionamiento 67+150 se utilizaron para modelar el estrato de suelo en ambos sitios de estudio.

- **Muestra M-1856-2022**

Se compone por los siguientes tipos de suelo: combinado suelo limo arenoso café grisáceo claro con alto contenido de partículas rocosas cúbicas y alargadas degradables es un material poco compacto y liviano. Se recolectó en una bolsa y tiene un peso aproximado de 15 kg.

- **Muestra M-1857-2022**

Consta de una bolsa de aproximadamente 15 kg proveniente de la zona del suceso de Cambronero del día 17 de setiembre del 2022, por el estacionamiento aproximado 67+150. Es un material combinado que contiene suelo areno limoso color gris claro y un alto grado de partículas rocosas cúbicas degradables color blancuzcas. También es un material poco compacto y algo liviano.



- **Muestra M-1858-2022**

Consta de tres bloques de suelo compuesto por una combinación de roca grisácea y suelo color café claro. Se caracteriza por ser un material frágil, degradable y poroso.

Dichas muestras pesan aproximadamente de 15 kg y provienen de la zona del suceso de Cambronero por el estacionamiento aproximado 67+150. La muestra se reacondicionó a las condiciones de laboratorio por lo que no fue necesario registrar los indicadores ambientales.

- **Muestra M-1859-2022**

Está compuesta por 3 rocas seleccionadas de forma aleatoria en el sitio del suceso de Cambronero.

### III.2 Ensayos de clasificación

Los ensayos que se muestran en este apartado son indispensables para una adecuada clasificación de los suelos de la zona de estudio. Una clasificación apropiada de los suelos es fundamental para conocer las características de su comportamiento ante lluvia u otros factores externos.

#### III.2.1 ASTM D2216 Procedimiento para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas

Tabla 2. Contenido de humedad de suelos y rocas, muestras indicadas

Muestra	Humedad natural (%)
M-1856-2022	29,2
M-1857-2022	30,3

#### III.2.2 ASTM D7263 Método de ensayo para la determinación en laboratorio de la densidad de especímenes de suelo

Tabla 3. Densidad de especímenes de suelo, muestra M-1858-2022

Muestra	Densidad total (húmeda) de la muestra de suelo (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad natural (%)	Porosidad (n)
M-1858-2022 (1)	1,68	37,1	0,53
M-1858-2022 (2)	1,48	37,1	0,62
M-1858-2022 (3)	1,65	37,1	0,58

#### III.2.3 ASTM D854 Procedimiento para determinar la gravedad específica del suelo

Tabla 4. Gravedad específica suelos, muestra M-1856-2022

Muestra	Método	G <sub>T</sub>	G <sub>s</sub>
M-1856-2022	B	2,555	2,554

Tabla 5. Gravedad específica suelos, muestra M-1857-2022

Muestra	Método	G <sub>T</sub>	G <sub>s</sub>
---------	--------	----------------	----------------



M-18576-2022	B	2,483	2,481
--------------	---	-------	-------

III.2.4 ASTM D4318 Procedimiento para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo

Tabla 6. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, muestra M-1856-2022

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad
M-1856-2022	61	37	24

Tabla 7. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, muestra M-1857-2022

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad
M-1857-2022	55	40	15

III.2.5 ASTM D1140 Métodos de ensayo estándar para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz 75 µm (Nº 200) en suelos mediante lavado

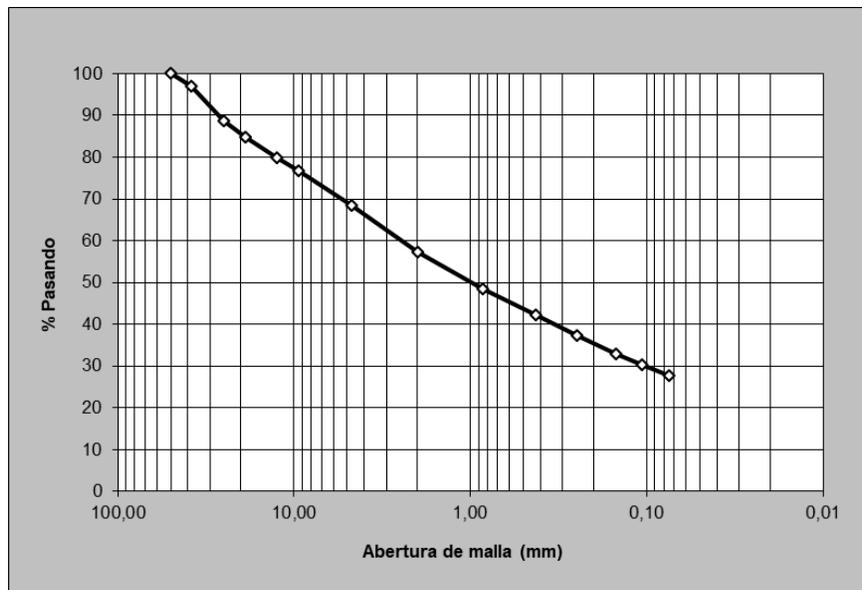


Figura 7. Curva granulométrica, muestra M-1856-2022



Figura 8. Curva granulométrica, muestra M-1857-2022

### III.3 Ensayos de resistencia

En este apartado se encuentran los resultados correspondientes a los ensayos de resistencia del suelo ante la aplicación de ciertos esfuerzos inducidos. Estos resultados permiten conocer el comportamiento geomecánico del material que conforma la zona de estudio.

#### III.3.1 ASTM D2166 Ensayo de compresión inconfiada de suelos cohesivos

Tabla 8. Resultados del ensayo compresión inconfiada de suelos cohesivos

Muestra	Esfuerzo de compresión máximo (kPa)	Resistencia al cortante (kPa)
01858-2022 M#1	43	21
01858-2022 M#2	29	14
01858-2022 M#3	21	16

#### III.3.2 ASTM D2938 Resistencia a la compresión inconfiada de Núcleos de Roca

Tabla 9. Resultados del ensayo de compresión inconfiada de roca, muestra M-1859-2022(1)

Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	L/D	Masa (g)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MPa)	Contenido Humedad (%)
M-1859-2022 (1)	50,2	122,9	2,4	683,6	159,2	81,1	0,3

Tabla 10. Resultados del ensayo de compresión inconfiada de roca, muestra M-1859-2022(2)

Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	L/D	Masa (g)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MPa)	Contenido Humedad (%)
M-1859-2022 (2)	50,3	123,1	2,4	681,4	155,0	78,9	0,5



Tabla 11. Resultados del ensayo de compresión inconfiada de roca, muestra M-1859-2022(3)

Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	L/D	Masa (g)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MPa)	Contenido Humedad (%)
M-1859-2022 (3)	50,2	120,0	2,4	659,8	295,0	150,3	0,6

### III.3.3 ASTM D6528 Método estándar de ensayo de corte directo simple para suelos finos consolidado no drenado

Para este ensayo se utilizaron tres muestras remoldeadas a partir de las cuales se obtuvieron los resultados que muestra la Tabla 13 y la Figura 9.

Tabla 12. Resultados consolidación corte directo, muestras indicadas

Muestra	Tiempo de saturación (h)	Tiempo de falla (s)	Horas de consolidación (h)	Consolidación máxima (mm)	Velocidad de falla (mm/min)
01857-2022 M#1	18	15 240	72	0,628	0,03944
01857-2022 M#2	18	10 800	24	1,980	0,05563
01857-2022 M#3	18	5 220	24	3,467	0,10941

Tabla 13. Resultados corte directo

Muestra	Carga Normal (N)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
01857-2022 M#1	157	50,0	82,2
01857-2022 M#2	315	100,0	108,4
01857-2022 M#3	630	199,9	196,4

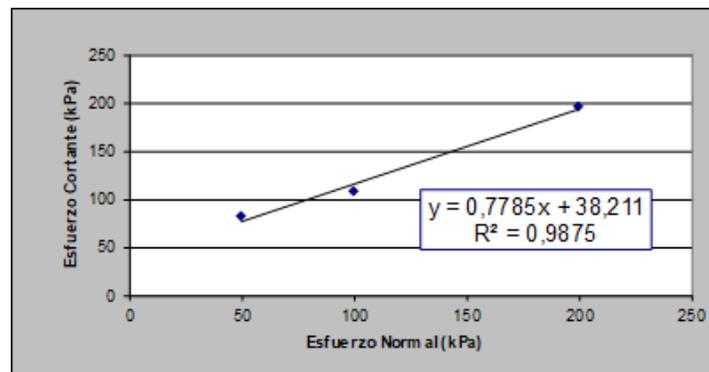


Figura 9. Esfuerzo cortante según esfuerzo normal aplicado

### III.4 Modelo geológico – geotécnico del sitio

Para la conformación del modelo geotécnico se parte de la limitante que, al ser una carretera de montaña con taludes cubiertos por vegetación densa, la recolección de muestras y la interpretación de la posible distribución de las capas de suelo, se obtienen a partir de la inspección en campo de sitios que tengan la cara del talud expuesta y sin vegetación. Como es el caso del talud ubicado en el km 66+200, el cual para lo que respecta a este informe se etiqueta como “Sitio 1”. Por su parte el deslizamiento ubicado en el km 68 se etiqueta como “Sitio 2”.



Luego de la visita del 09 de noviembre de 2022 para recolección de muestras, fue posible determinar que el sitio 1 tal y como se observa en la Figura 10, aparenta estar conformado por una capa de suelo que abarca los primeros metros desde la superficie de la cara del talud y hasta una profundidad que en campo no es posible establecer. Sin embargo, a media altura se identifica el afloramiento de lo que aparenta ser un estrato de roca, la cual aflora luego de el deslizamiento de la capa de suelo ocurrido el 17 de setiembre de 2022.

Con ayuda del levantamiento realizado con el VANT el día 05 de octubre de 2022, fue posible estimar el espesor de la capa de suelo que conforma el talud del sitio 1 a evaluar. Sin embargo, y debido a que estos datos no son exactos, y para conocer con mayor precisión el espesor de las capas que conforman la estratigrafía del terreno a analizar, es necesario contar con otras metodologías de exploración geotécnica, por lo que, se analiza el sitio 1 suponiendo en un primer caso que su estratigrafía se conforma únicamente de un material granular, y en un segundo caso, suponiendo una capa de suelo de espesor variable desde la corona del talud y hasta el pie del talud, subyacida por un estrato rocoso. Las propiedades geomecánicas de ambos materiales se muestran en la Tabla 14.



Figura 10. Conformación de la estratigrafía del sitio 1



Por su parte, el sitio 2 de análisis se conforma principalmente por un suelo cohesivo rojizo, con algunos bloques aleatorios de roca que aparentemente no predominan en la estratigrafía del talud para ser considerados como un estrato rocoso. Sin embargo, debido a la limitada exploración geotécnica con la que se cuenta, se considera recomendable ahondar en la exploración del sitio para determinar con mayor exactitud la estratigrafía del sitio.

Para efectos de este análisis que es de carácter preliminar, el sitio dos se modela suponiendo que se conforma en su totalidad por un único material con las propiedades del suelo indicadas en la Tabla 14.



Figura 11. Conformación de la estratigrafía del sitio 2

En la Tabla 14 se muestran los valores a utilizar como parámetros de resistencia para la capa conformada por suelo en los análisis de estabilidad. Estos valores se obtienen a partir de los resultados del ensayo de corte directo.

EIC-Lanamme-INF-0493-2023	Mayo de 2023	Página 24 de 44
---------------------------	--------------	-----------------



Tabla 14. Parámetros de resistencia a utilizar en la capa de suelo y roca

Parámetro/material	Suelo	Roca
Peso unitario $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,7	27,5
Cohesión (kPa)	38,2	-
Ángulo de fricción (°)	37,9	-
Compresión uniaxial de roca (kPa)	-	103400
GSI	-	50
mi	-	25
D	-	1

### III.5 Modelo de elevación digital (MED)

Inicialmente, con la colaboración de la Unidad de Gestión y evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) del PITRA del LanammeUCR, se realizaron los levantamientos de cada sitio de estudio, con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona de estudio el día 05 de octubre de 2022.

Este levantamiento permitió la generación de un Modelo de Elevación Digital (MED) por medio de técnicas de fotogrametría. Mediante esta metodología es posible realizar la reconstrucción geométrica de un objeto por medio de fotografías captadas desde diferentes puntos de vista y respetando un porcentaje de traslape entre una y otra. Lo anterior aplicado al análisis de superficies en el campo de la geotecnia, permite recrear modelos tridimensionales que representan la forma y características topográficas de un sitio, y con esto es posible identificar posibles zonas inestables que serían imposibles de apreciar desde el nivel del terreno.

Es importante resaltar que la precisión de los modelos obtenidos depende de una selección adecuada de la altura y el área del vuelo. De tal forma que, a mayor altura, menor resolución y, por ende, menor precisión del modelo.

Teniendo esto en consideración y con base en el levantamiento realizado con el VANT de la UGERVN, fue posible obtener el modelo de elevación que se muestra en la Figura 12 para el sitio de estudio N°1 ubicado en el km 66 de la Ruta Nacional No. 1 (Figura 12), de igual manera se obtuvo la nube de puntos respectiva para el sitio de estudio N°2. Como se observa, los levantamientos realizados permitieron recrear el terreno para su posterior análisis.

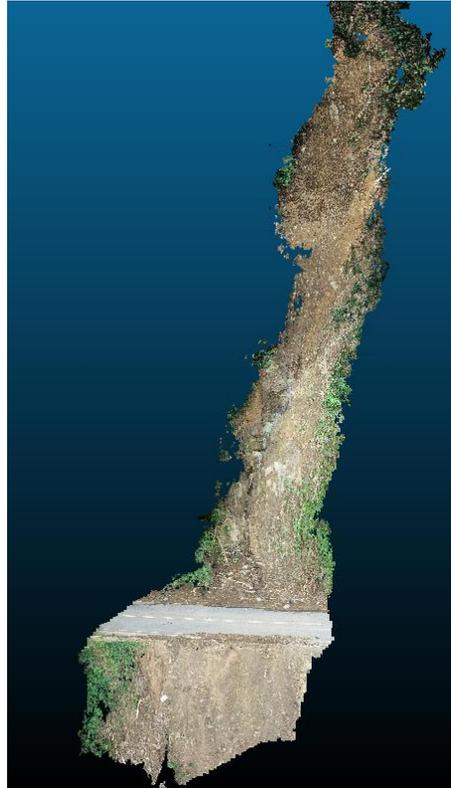


Figura 12. Nube de puntos obtenida de la zona de estudio del sitio 1 km 66 Ruta Nacional No. 1 como resultado del levantamiento realizado con el VANT

Posterior a la nube de puntos que conforma el modelo de los sitios de estudio se procede a construir el modelo de elevación digital (MED) para cada sitio, y con ayuda del software QGIS es posible generar las curvas de nivel representativas de la superficie del terreno, tal y como se observa en la Figura 13, que finalmente se traducen en una superficie, a la cual se le asignan las propiedades geomecánicas del material que las conforma obtenidas en los apartados anteriores, para el posterior análisis de estabilidad del talud.

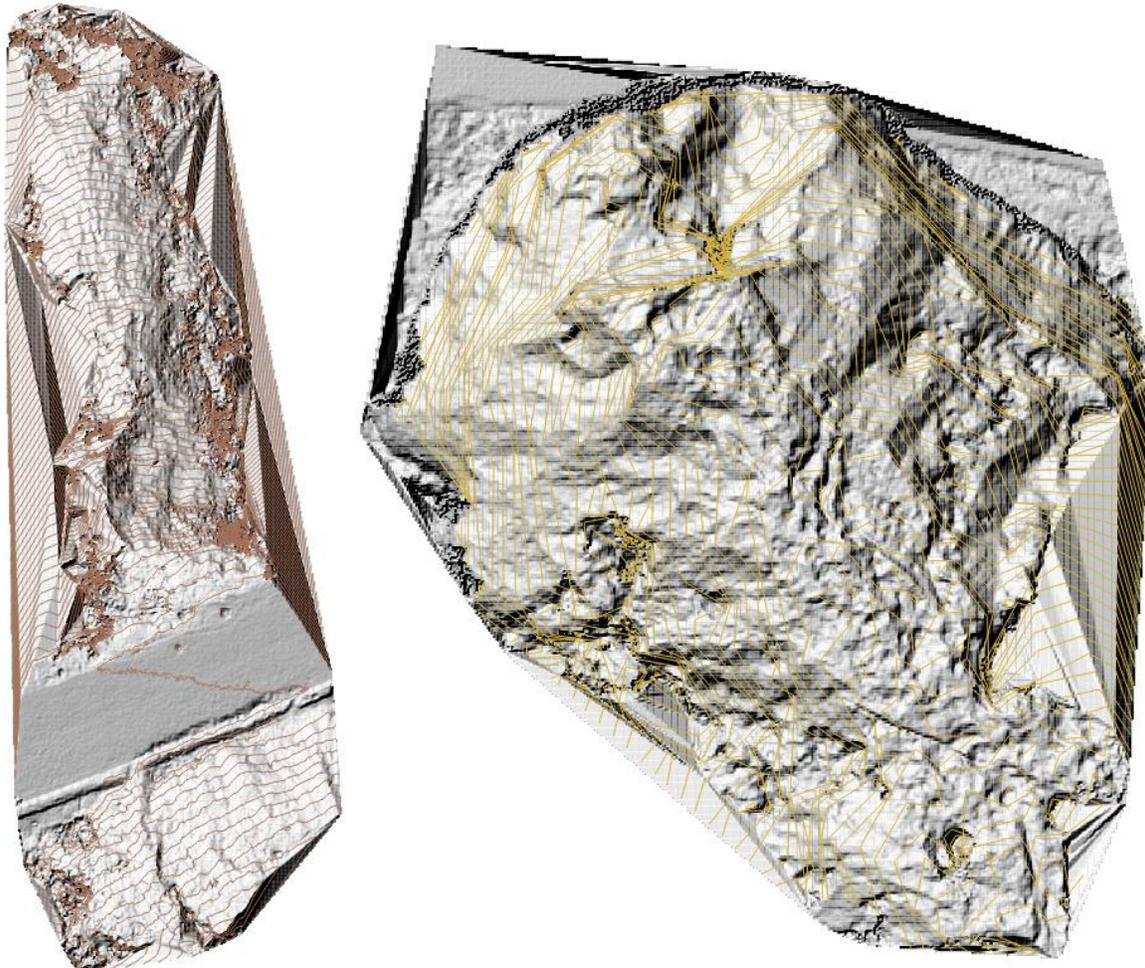


Figura 13. MED y curvas de nivel de los sitios de estudio 1 y 2 respectivamente de la Ruta Nacional No. 1

#### ***IV. Comprobación de estabilidad de los taludes utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL)***

Actualmente, la mayoría de los estudios de estabilidad de taludes se basan en los Métodos de Equilibrio Límite (MEL), donde se considera la relación fuerzas deslizantes y fuerzas resistentes a lo largo de una superficie de falla dada. Se utilizan tres ecuaciones de equilibrio de fuerzas horizontales, equilibrio de fuerzas verticales y equilibrio de momentos. Algunos de estos métodos utilizan dovelas con una o dos ecuaciones de equilibrio haciendo la solución “no rigurosa”. Sin importar el procedimiento empleado para resolver el sistema de ecuaciones en los métodos de equilibrio límite, existirán más incógnitas que número de ecuaciones de equilibrio, haciendo de la solución de la estabilidad un problema estáticamente indeterminado.

Los métodos “rigurosos”, son aquellos que satisfacen las tres ecuaciones de equilibrio, como el método de Spencer y de Morgenstern y Price.



Para el caso en el que la superficie de falla sea circular, el método Simplificado de Bishop produce valores del factor de seguridad que están en correspondencia con los métodos rigurosos, a pesar de que emplea únicamente dos ecuaciones de equilibrio (fuerzas verticales y momentos).

Al hacer uso de estas metodologías de análisis es importante tener en consideración que, existen limitaciones propias de cada método, las cuales deben ser tomadas en cuenta a la hora de elegir el método que mejor responda a las condiciones específicas del sitio de análisis. Así pues, entre las limitaciones generales que tiene el MEL se pueden mencionar:

- No se incluye un análisis de deformaciones
- La base de cálculo considera un equilibrio estático de fuerzas estáticas. Sin embargo, una vez que se genera la falla, el modelo deja de ser aplicable, puesto que la geometría de análisis cambia, y comienza a darse un movimiento de la masa de suelo, con el cual se deja de tener un equilibrio estático
- Se supone una distribución uniforme de esfuerzos en la base de los elementos o dovelas.

Por su parte, dependiendo de los diferentes métodos de equilibrio límite que existen, se pueden encontrar otras limitaciones tales como:

- Se asume que el talud tiene un material isotrópico
- Se puede asumir la existencia, o no, de fuerzas cortantes entre las dovelas
- En algunas metodologías se asume un equilibrio de momentos
- Se asume una superficie de falla

El objetivo de este análisis de estabilidad es obtener de manera preliminar un factor de seguridad a partir de metodologías de análisis de equilibrio límite. De acuerdo con las recomendaciones establecidas en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (CGTLCR), se considera para el sitio de estudio el riesgo de pérdidas humanas en un nivel alto y el riesgo de daños económicos y ambientales en un nivel alto, para lo cual es aceptable un valor de factor de seguridad de 1,50 en condición estática. Para la condición de sismo (pseudo-estática) se utiliza el coeficiente de aceleración del suelo de 0,15 g definido en el CGTLCR para el sitio ubicado en Zona III con tipo de suelo S2, para lo cual es aceptable un valor de factor de seguridad de 1,10.

No obstante, es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos de esta región ya que, la información disponible de la exploración geotécnica es limitada y el estudio completo correspondiente, es competencia de la Administración. Sin embargo, este análisis preliminar puede constituir un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos.

Para el análisis preliminar de los sitios mencionados con anterioridad, se utilizó el Modelo de Elevación Digital (MED) obtenido con ayuda del VANT, los parámetros y propiedades de los materiales obtenidos mediante muestreo en sitio, ensayos de laboratorio y, el uso del software SLIDE3 del paquete de programas de RocScience.

Además, para analizar los modelos de ambos sitios, después de estudiar y complementar con información obtenida durante las visitas de campo, se considera apropiado para los análisis considerar para el sitio 1 dos posibles conformaciones del perfil del terreno, suponiendo en primera instancia que el talud está conformado por completo de un material granular tipo suelo y en un segundo panorama se considera que el terreno se conforma por dos capas: un suelo con las características de material granular anteriormente mencionado y una capa subyacente de roca.

EIC-Lanamme-INF-0493-2023	Mayo de 2023	Página 28 de 44
---------------------------	--------------	-----------------



Por su parte el sitio 2 se considera que es mayormente conformado por el material granular por lo que el análisis se realiza suponiendo que todo el talud está conformado con las propiedades geotécnicas del material granular tipo suelo. A continuación, se comentan los detalles de cada análisis realizado.

#### IV.1 Resultado de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) del sitio 1 ubicado en el km 66 de la Ruta Nacional No. 1

Para realizar el análisis de estabilidad se consideró el terreno suponiendo que se encuentra compuesto por una sola capa de material homogéneo tipo suelo granular y en cuatro estados diferentes: suelo completamente seco en condición estática, suelo completamente seco y bajo la acción de un sismo con un coeficiente pseudo-estático  $a_{ef}$  de 0,15g, y estas mismas condiciones tanto estática como dinámica para el suelo en estado completamente saturado. Las propiedades de este material son las mostradas en la Tabla 14.

En la Figura 14 se muestra el mapa de factores de seguridad sobre la superficie analizada para la condición seca y estática utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop. La Figura 15 muestra el mapa de factores de seguridad para la condición de análisis seca y pseudo-estática.

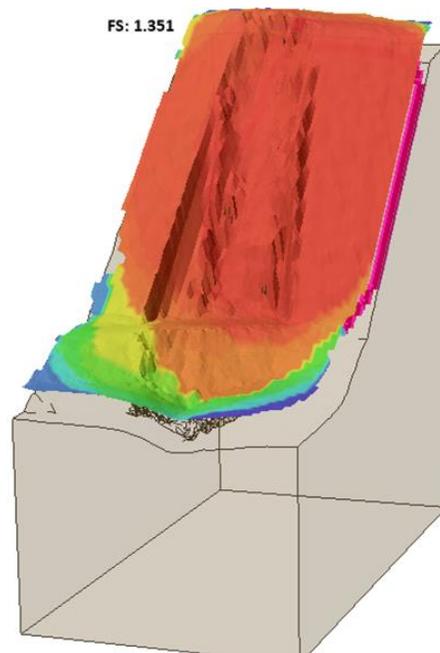


Figura 14. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición seca y estática obtenidos con la metodología de Bishop

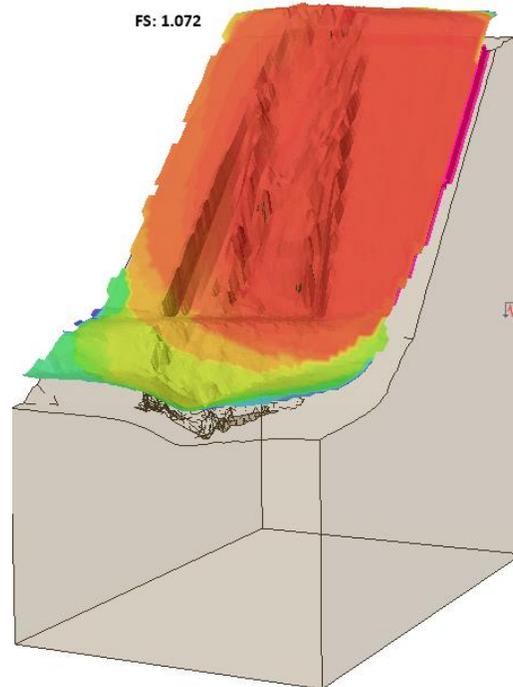


Figura 15. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición seca y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop

Como se puede observar para la condición seca estática y pseudo-estática el sitio 1 no cumple con el factor de seguridad establecido por el CGTLCR. Es posible identificar en los resultados que la zona inestable corresponde a la superficie de la cara del talud, esto debido a la geometría resultante luego de la ocurrencia del deslizamiento. De acuerdo con lo observado en sitio, esta geometría es bastante irregular y con una pendiente alta, lo cual no favorece la estabilidad del talud.

Por su parte, la Figura 16 y Figura 17 muestran los resultados cuando se ejecuta el análisis en estado saturado del suelo para la condición estática y pseudo-estática utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop. Como se puede observar, el análisis con estas condiciones despliega resultados muy por debajo del valor recomendado por el CGTLCR e incluso inferiores a 1,0, lo cual muestra un incumplimiento con respecto las recomendaciones dadas por el CGTLCR.

Dados estos resultados, obtenidos bajo condiciones limitadas de exploración geotécnica, se considera adecuado prestar mayor atención a este sitio y realizar análisis más detallados, contado con una exploración geotécnica más exhaustiva y acorde con la magnitud del problema, con el fin de intervenir el talud para mejorar la estabilidad del sitio, si así lo amerita. Cabe resaltar que es recomendable que estos análisis se realicen lo antes posible, previo a que inicie la época lluviosa en Costa Rica para evitar que el terreno alcance su condición crítica con la saturación de los suelos.

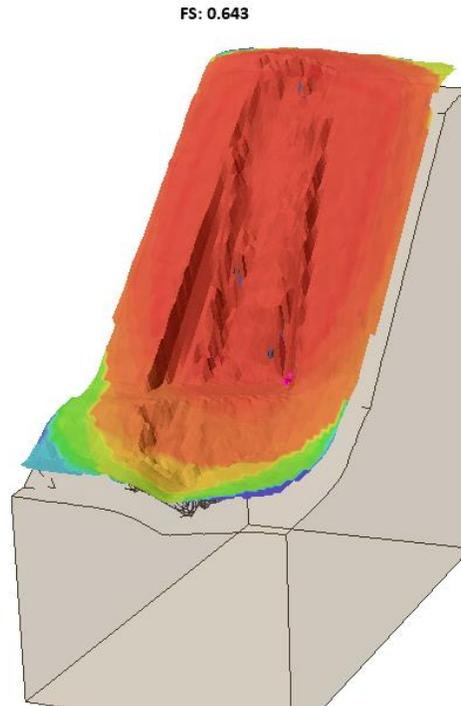


Figura 16. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición saturada y estática obtenidos con la metodología de Bishop

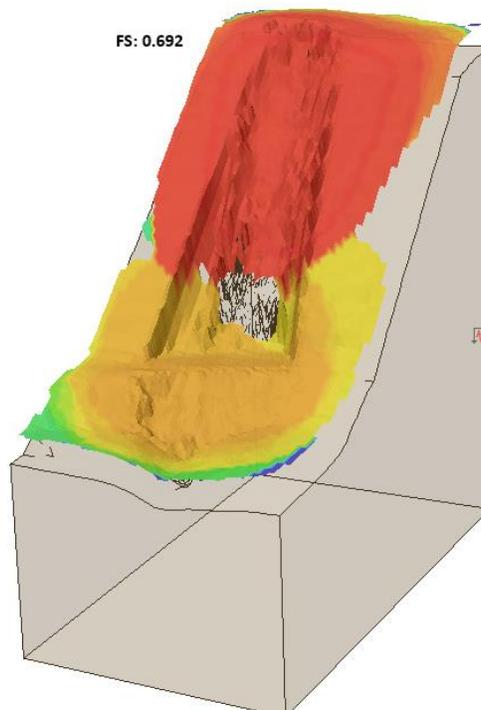


Figura 17. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición saturada y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop



Finalmente se muestra en la Tabla 15 un resumen de los factores de seguridad obtenidos para cada caso de análisis utilizando las metodologías de Bishop y Janbu, así como el factor de seguridad recomendado por el CGTLCR. Las celdas marcadas de color rojo indican el incumplimiento del FS obtenido respecto al indicado en la normativa costarricense para el caso analizado.

Tabla 15. Resumen de resultados del Factor de seguridad obtenido para las diferentes condiciones evaluadas en el deslizamiento del sitio 2

		Seco		Saturado		CGTLCR
Sitio 1	Estático	Bishop	Janbu	Bishop	Janbu	1,50
		1,35	1,31	0,64	0,62	
Sitio 1	Pseudo-estático	Bishop	Janbu	Bishop	Janbu	1,10
		1,07	1,01	0,69	0,61	

#### IV.2 Resultado de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) del sitio 1 suponiendo un perfil del suelo estratificado

Como se mencionó en apartados anteriores, según lo observado en campo, el sitio 1 se caracteriza por la presencia de una capa de suelo y afloramientos de roca (ver Figura 18.b). El muestreo del material del sitio incluye fragmentos de roca, para los que en el laboratorio se determina la resistencia a la compresión. Es por ello que en este apartado se analiza el sitio 1 conformado por una capa superficial de suelo con un espesor aproximado de 10 m en la corona y 5 m en el pie del talud superpuesta a la roca. Logrando una configuración similar a la observada en sitio tal y como se observa en la Figura 18, se resalta con un círculo negro el afloramiento de roca a media altura observada en el sitio. La estratigrafía se modela con el software Slide 3 de la casa Rocscience, tal y como se muestra en la Figura 18, logrando una distribución de materiales en el talud similar al campo. Las propiedades de ambos materiales se muestran en la Tabla 14.

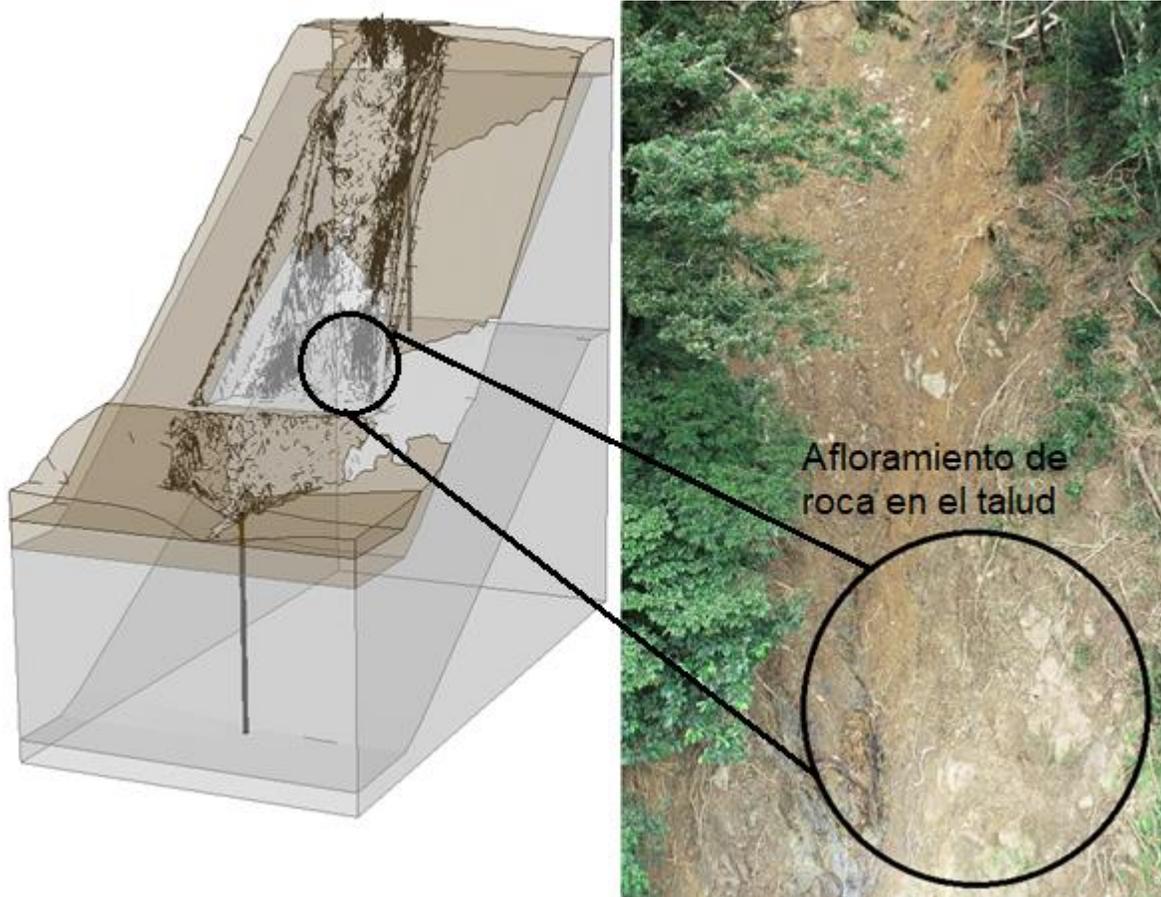


Figura 18. Perfil estratificado del sitio de análisis 1

Para este caso de análisis se obtienen resultados consistentes con el estado en que se encuentra actualmente el sitio, dando como resultado factores de seguridad que cumplen con lo recomendado en el CGTLCR en condición seca y estática. Esta condición es esperable ya que, a lo largo de los meses secos, el talud no ha presentado problemas de estabilidad. Sin embargo, al inducir una carga de sismo e incluir agua en los análisis los resultados como se muestran a continuación presentan resultados que no cumplen con los factores de seguridad indicados en el CGTLCR.

En la Figura 19 se presenta el mapa de contornos de factores de seguridad del análisis considerando el terreno completamente seco y estático, además tomando en cuenta una capa de roca por debajo de la capa de suelo. Utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop, el análisis despliega resultados que cumplen con lo recomendado por el CGTLCR, por lo que bajo estas condiciones se considera un talud estable. De igual manera, como se observa en la Figura 20, los factores de seguridad obtenidos cumplen con lo recomendado en el CGTLCR. Cabe resaltar que el mapa de contornos resalta la corona del talud como la zona donde se concentran los factores de seguridad más bajos.

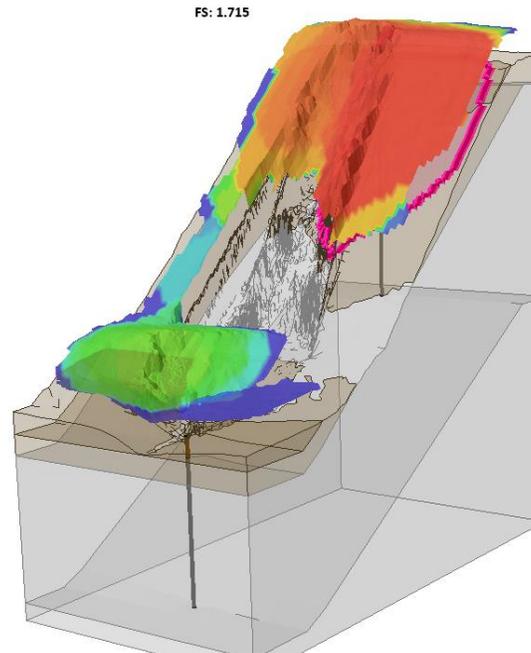


Figura 19. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición seca y estática obtenidos con la metodología de Bishop suponiendo un perfil estratificado

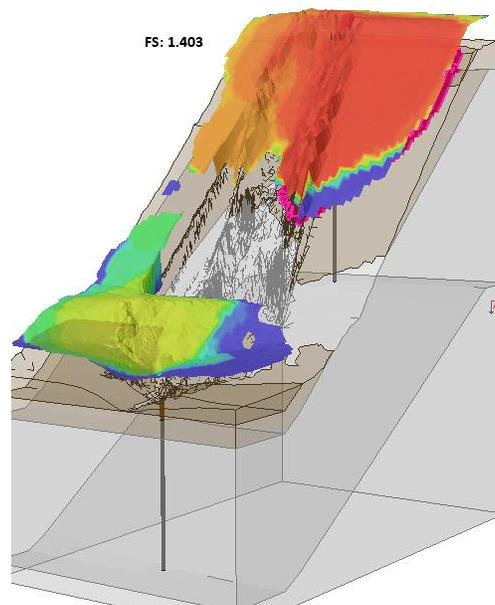


Figura 20. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición seca y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop suponiendo un perfil estratificado

Por su parte la Figura 21 y Figura 22 presentan el mapa de contornos de factores de seguridad del análisis considerando el terreno saturado en condición estática y pseudo estática respectivamente. Para ambas condiciones analizadas los resultados no cumplen con lo recomendado en el CGTLCR.

Sin embargo, los resultados son superiores a 1,0, siendo este el valor que representa el equilibrio límite de un terreno.

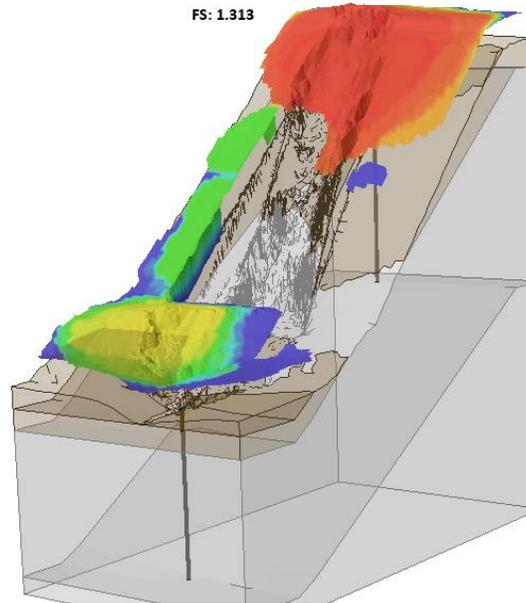


Figura 21. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición saturada y estática obtenidos con la metodología de Bishop suponiendo un perfil estratificado

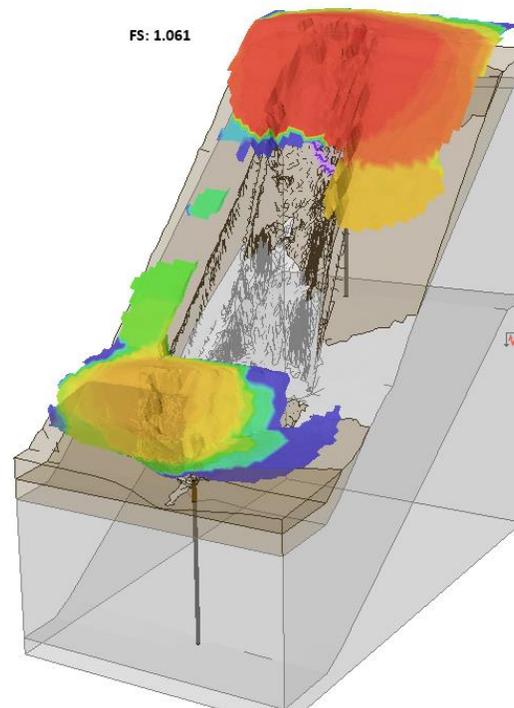


Figura 22. Mapa de contornos de factores de seguridad para el sitio 1 en condición saturada y pseudo estática obtenidos con la metodología de Bishop suponiendo un perfil estratificado



En la Tabla 16 se muestra el resumen de los resultados obtenidos para el análisis de estabilidad utilizando las metodologías de equilibrio límite de Bishop y Janbu, comparándolos con los valores recomendados en el CGTLCR. Se encuentra resaltado en rojo los resultados de los análisis que no cumplen con los requerimientos de estabilidad de la normativa costarricense.

Tabla 16. Resumen de resultados del Factor de seguridad obtenido para las diferentes condiciones evaluadas en el deslizamiento del sitio 1 suponiendo un perfil estratificado

Sitio 1	estático	Seco		Saturado		Código
		Bishop	Janbu	Bishop	Janbu	
Sitio 1	estático	1,71	1,67	1,31	1,29	1,50
		Bishop	Janbu	Bishop	Janbu	1,10
Pseudo-estático	Pseudo-estático	1,4	1,34	1,06	1,00	
		Bishop	Janbu	Bishop	Janbu	

Dado que el análisis considerando el perfil del terreno estratificado, resulta más representativo de la condición observada en sitio durante las visitas de campo. Se considera importante mantener el sitio monitoreado ya que, como se observa en los resultados mientras el terreno se encuentre seco no presenta problemas de estabilidad, pero una vez inicia la época lluviosa los suelos se saturan aumentando la probabilidad de que exista inestabilidad en el terreno.

#### IV.3 Resultado de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) del sitio 2 ubicado aproximadamente en el km 68 de la Ruta Nacional 1

Para realizar el análisis de estabilidad se consideró el terreno suponiendo que se encuentra compuesto por una sola capa de material homogéneo tipo suelo granular, ya que la condición observada en campo predomina en conformación de la estratigrafía del talud el material suelo.

El análisis se ejecuta en cuatro estados diferentes: suelo completamente seco en condición estática, suelo completamente seco y bajo la acción de un sismo con un coeficiente pseudo-estático  $a_{ef}$  de 0,15g, y estas mismas condiciones tanto estática como dinámica para el suelo en estado completamente saturado. Las propiedades de este material son las mostradas en la Tabla 14.

Las Figura 23 y Figura 24 muestran el mapa de los factores de seguridad utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop para el análisis del sitio 2 en estado seco y en condición estática o pseudo estática respectivamente.

En ambas condiciones analizadas, para el estado seco del suelo se obtienen valores de factores de seguridad superiores a 1,50 y 1,10 para la condición estática y pseudo estática respectivamente, los cuales son los recomendados por el CGTLCR. Por lo tanto, bajo las condiciones de este análisis preliminar, en que se realizó una exploración geotécnica limitada, el sitio 2 en condición seca se encuentra estable.



FS: 2.439

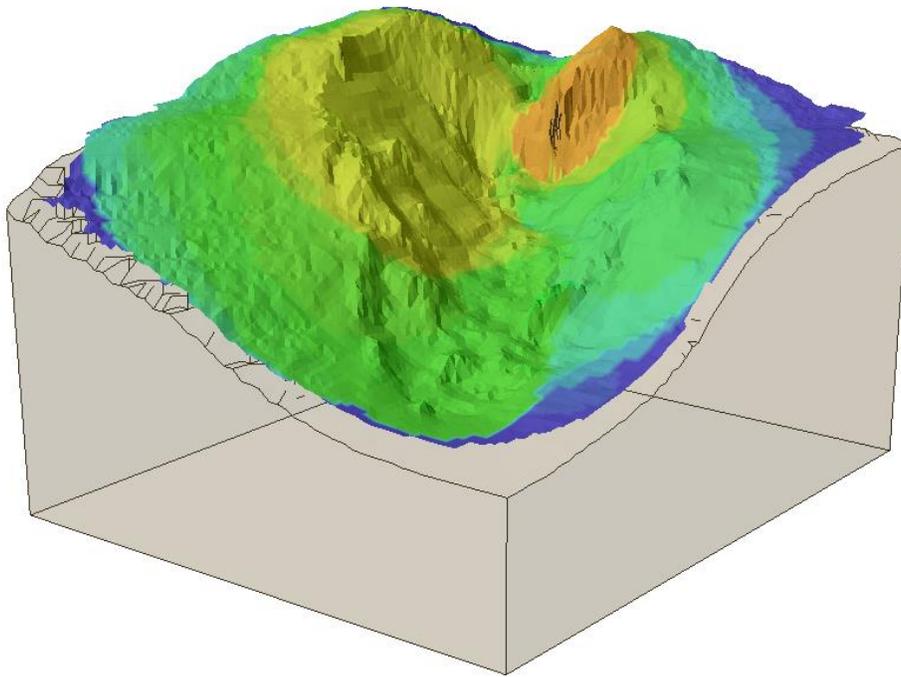


Figura 23. Mapa de contornos de Factores de seguridad para el sitio 2 en condición seca y estática obtenidos con la metodología de Bishop

FS: 2.401

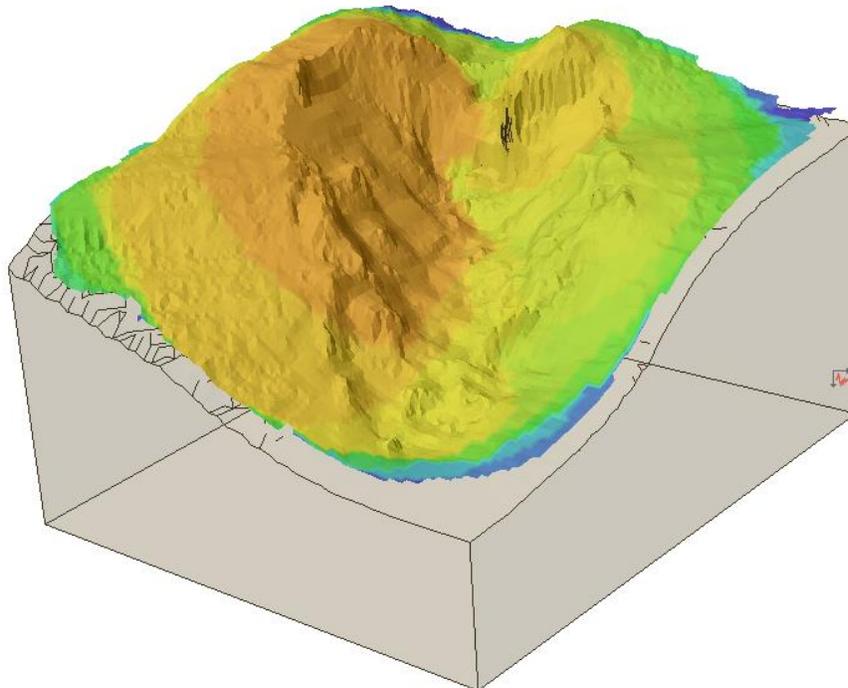


Figura 24. Mapa de contornos de Factores de seguridad para el sitio 2 en condición seca y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop

EIC-Lanamme-INF-0493-2023	Mayo de 2023	Página 37 de 44
---------------------------	--------------	-----------------



Por otro lado, el suelo en estado saturado en condición estática y pseudo-estática se muestra en las Figura 25 y Figura 26. Como se puede observar, existe una zona en la parte superior y derecha del talud que, al encontrarse el suelo saturado se torna inestable con valores de factor de seguridad inferiores a los recomendados en el CGTLCR. Por esta razón y al igual que como se mencionó en el análisis del sitio 1, se considera apropiado realizar análisis más exhaustivos en el sitio previos al inicio de la época lluviosa, ya que una vez el terreno se sature existe la posibilidad de que se puedan presentar problemas de inestabilidad.

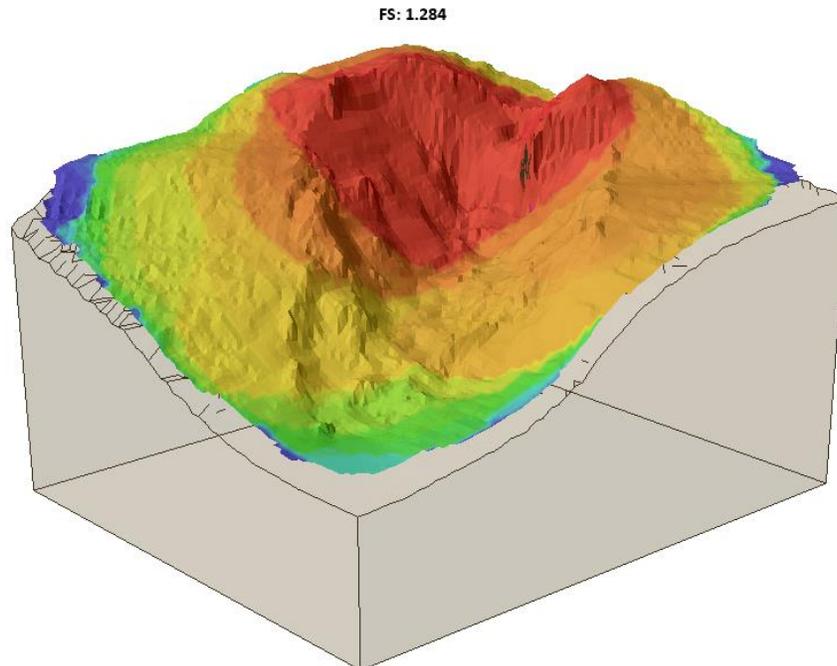


Figura 25. Mapa de contornos de Factores de seguridad para el sitio 2 en condición saturado y estática obtenidos con la metodología de Bishop

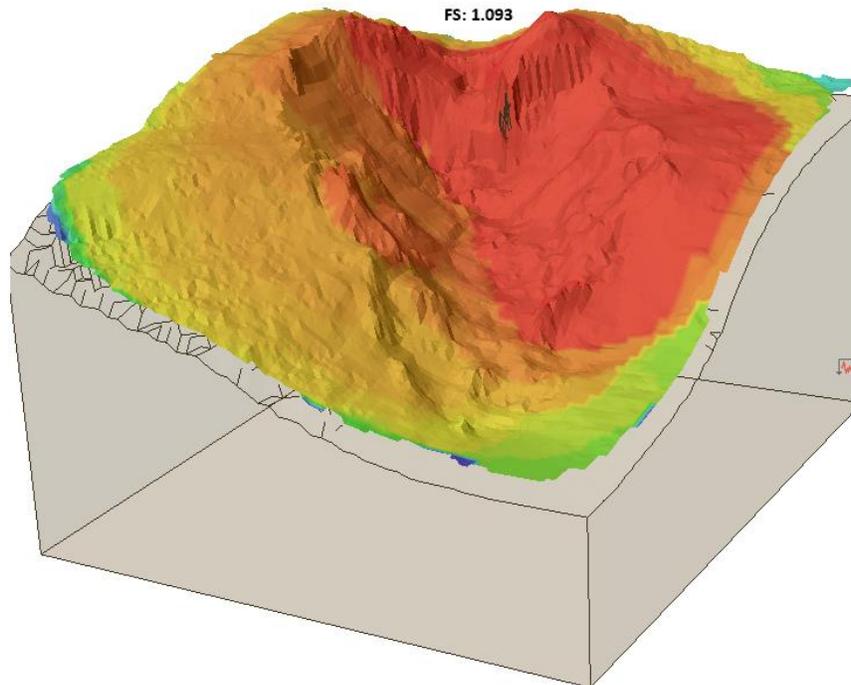


Figura 26. Mapa de contornos de Factores de seguridad para el sitio 2 en condición saturado y pseudo-estática obtenidos con la metodología de Bishop

Finalmente, en la Tabla 17 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el deslizamiento del sitio 2, para el análisis de estabilidad utilizando las metodologías de equilibrio límite de Bishop y Janbu, comparándolos con los valores recomendados en el CGTLCR. Se encuentra resaltado en rojo los resultados de los análisis que no cumplen con los requerimientos de estabilidad de la normativa costarricense.

Tabla 17. Resumen de resultados del Factor de seguridad obtenido para las diferentes condiciones evaluadas en el deslizamiento del sitio 2

		Seco		Saturado		CGTLCR
		Bishop	Janbu	Bishop	Janbu	
Sitio 2	Estatico	Bishop	Janbu	Bishop	Janbu	1,50
		2,43	2,39	1,28	1,13	
	Pseudo-estático	Bishop	Janbu	Bishop	Janbu	1,10
		2,40	2,30	1,09	1,01	

## V. Condición actual

El lunes 21 de marzo de 2023 se realizó una nueva visita al sitio de interés, en la cual se realizó un levantamiento con VANT que abarca aproximadamente 2 km de la Ruta Nacional No. 1, cuyas coordenadas CRTM05 se muestran en la Tabla 18. En la Figura 27 se muestra la ortofotografía del área levantada.

Tabla 18. Coordenadas de inicio y final del levantamiento de la condición actual de la zona de estudio

Coordenada	Punto inicio	Punto final
X	442641,8417	441062,276
Y	1109565,3468	1109481,7383
Z	871m	788m



Figura 27. Ortofotografía de la condición actual del sitio de estudio en Cambronero sobre Ruta Nacional No. 1

Mediante este levantamiento es posible realizar un análisis global del sitio e identificar aspectos geotécnicos e hidrológicos que condicionan la estabilidad de los taludes en la zona estudiada. Por ejemplo, en la figura 24, es posible identificar el sitio del deslizamiento del punto 1, pero además se pueden registrar otros sitios en los que ocurrieron deslizamientos de menor magnitud, así como líneas de drenaje natural.

En la Figura 28 en rojo se resalta lo que aparenta ser el recorrido de material deslizado desde la parte alta del talud que colinda con la servidumbre de una propiedad privada hasta a pocos metros de la vía en el punto  $X=442316.285$ ;  $Y=1109679.542$  dadas en coordenadas CRTM05. Este deslizamiento no parece haber afectado la vía, sin embargo, al pie del talud es posible observar en la fotografía, que la orientación de los árboles no es completamente vertical, lo cual es un indicador de inestabilidad del sitio que si se encuentra cercano a la carretera.



Figura 28. Evidencia de deslizamiento de material en los taludes de Ruta Nacional No. 1

En la Figura 29, se resalta en un círculo rojo el deslizamiento correspondiente al sitio 1 analizado en este informe. Aproximadamente a 140 m se observa evidencia de movimiento del terreno en el talud inferior al nivel de la vía, a una distancia similar, se observa otra evidencia del movimiento en el mismo talud. Dadas estas evidencias, se considera apropiado monitorear estos taludes ya que en una sección de aproximadamente 300 m existen 3 sitios con evidencia de inestabilidad en el terreno.



Figura 29. Evidencia de movimiento en el terreno cercano al deslizamiento del sitio 1

Finalmente, con ayuda del software QGIS, es posible visualizar el levantamiento en 3D, esta vista permite identificar con mayor claridad la presencia de drenajes naturales en taludes de la zona estudiada. Los drenajes naturales son caminos preferenciales de flujo de agua producto de la escorrentía superficial.

En la Figura 30, se resalta el recorrido que sigue lo que puede ser un drenaje natural, que además parece nace en la zona donde se identifica la presencia de lagunas. Se considera recomendable prestar especial atención a esta área y complementar con estudio hidrológico de la zona, esto debido a que el drenaje natural existente puede ser un camino por el cual se filtre agua proveniente de las lagunas, manteniendo un flujo constante de agua que puede ser el detonante de erosión y saturación del material que potencialice la inestabilidad del terreno a futuro. A raíz de lo observado, es importante garantizar el adecuado manejo del agua de estas lagunas, así como el agua de escorrentía superficial.

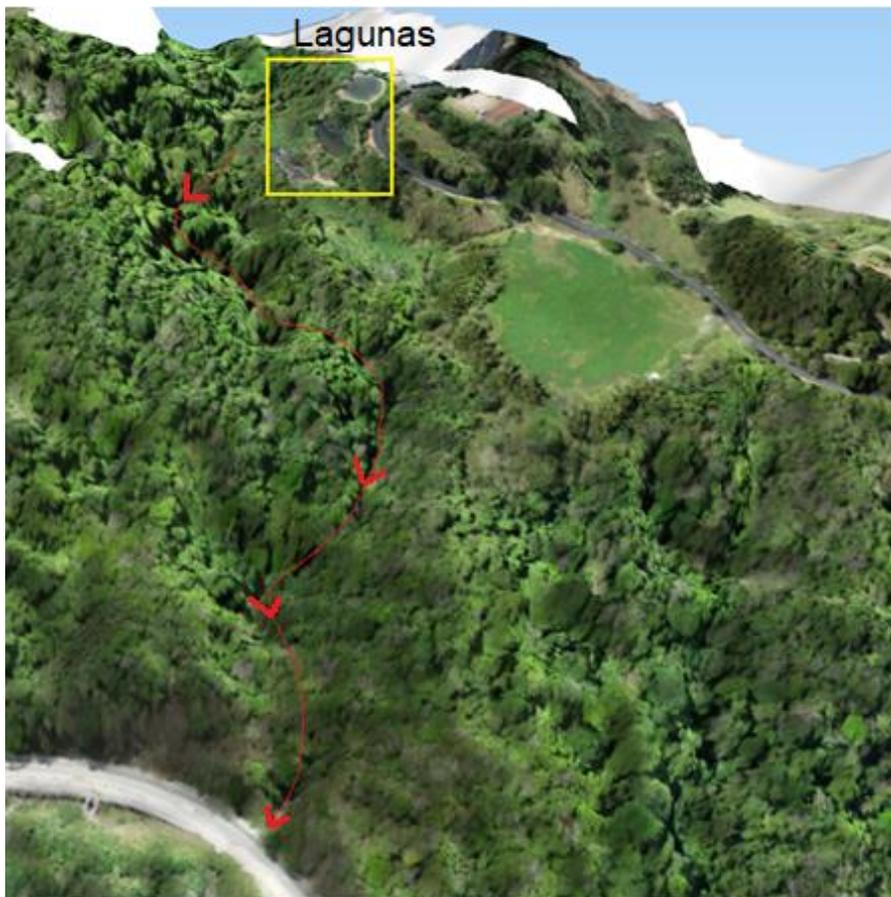


Figura 30. Recorrido de drenaje natural alineado con lagunas en la corona del talud

Por su parte, en la Figura 31 se resalta el recorrido que sigue lo que puede ser un drenaje natural ramificado y que además se encuentra cercano a la zona donde se ubica el sitio 1 analizado en apartados anteriores de este informe.



Figura 31. Recorrido de drenaje natural ramificado cercano al deslizamiento del sitio 1

En cuanto a los drenajes naturales, se considera apropiado contar con un análisis hidrológico de la zona, para conocer de manera más precisa los caminos preferenciales que tiende a seguir el agua de escorrentía superficial, ya que, como se observó en los resultados de los análisis de estabilidad, una de las condiciones que tornan crítica la condición de estabilidad del terreno es la saturación del terreno. Por lo tanto, es fundamental implementar apropiadas estructuras de manejo de aguas de escorrentía superficial.

## VI. Comentarios finales

Teniendo en consideración los resultados mostrados en las secciones anteriores, es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos, ya que se fundamenta en una exploración geotécnica limitada. No obstante, ante los resultados obtenidos, es importante destacar que un estudio más detallado y exhaustivo debe ser realizado por la Administración para emitir las propuestas e implementación de obras de estabilidad de taludes y manejo de aguas de escorrentía superficial necesarias. Sin embargo, se espera que el presente informe, constituya un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo estos análisis y con ello evaluar las afectaciones que puede sufrir la Ruta Nacional No. 1 y sus usuarios en la zona estudiada.

Asi mismo, se sugiere a la Administración, llevar a cabo estudios adicionales, incluyendo toma de muestras de suelo a mayor profundidad para poder construir un modelo geotécnico que sea más representativo del sitio analizado, es decir una exploración geotécnica más detallada, que incluya ensayos in situ y de laboratorio, que permitan construir un adecuado perfil geotécnico del sitio, así

EIC-Lanamme-INF-0493-2023	Mayo de 2023	Página 43 de 44
---------------------------	--------------	-----------------



como la limpieza de material vegetal en la cara del talud para establecer con mayor certeza la topografía real del sitio. Prescindir de este análisis puede resultar en afectaciones tanto económicas, como de riesgo para los usuarios que transitan por la vía.

A partir de los resultados obtenidos de los modelos construidos con la información del levantamiento de octubre 2022, se destaca que, para las propiedades del material utilizado, el cual se extrapoló hacia todo el terreno, los factores de seguridad no cumplen con los requisitos de estabilidad definidos por el CGTLCR en condición seca y saturada para el sitio 1 y en condición saturada para el sitio 2.

No obstante, como se mencionó anteriormente estos resultados no son definitivos ya que este análisis tiene limitantes, en especial de la exploración geotécnica, que para tomar decisiones definitivas respecto a la estabilidad de los taludes se deberán realizar análisis adicionales y exhaustivos.

Adicionalmente, refiriéndose a la situación actual del sitio, partiendo del levantamiento más reciente realizado en marzo 2023, es posible identificar zonas con evidencia de inestabilidad en el terreno en diferentes puntos. Además, con los resultados de los análisis de equilibrio, queda en evidencia que la saturación del terreno es uno de los factores críticos que condicionan la estabilidad de los taludes, por lo tanto, se considera oportuno prestar atención en los drenajes naturales de escorrentía superficial y considerar análisis hidrológicos que permitan diseñar sistemas para el manejo adecuado de estas aguas y evitar su influencia en la estabilidad de los taludes.

Finalmente, durante las visitas realizadas, se observaron taludes a lo largo del recorrido por la Ruta Nacional No. 1 que carecen de sistemas adecuados para el control de la escorrentía superficial, por lo que se recomienda implementar medidas integrales para detener y evitar la erosión de la cara de los taludes, así como, colocar sistemas para el control de la escorrentía superficial, con el fin de evitar que los sitios inestables identificados empeoren.

## VII. Referencias

1. Alvarado, M.E., 1982: Estudios sedimentológicos en la Formación Pacacua (Mioceno, Costa Rica). Tesis de Licenciatura, ECG-UCR, 185 pp.
2. Asociación de geotecnia (2009). Código de Cimentaciones de Costa Rica. Tecnológico de Costa Rica
3. Laboratorio de Geotécnica (2023). EIC-Lanamme-INF-0324-2023 Informe de ensayo muestras Ruta Nacional No.1. LanammeUCR. San José, Costa Rica.
4. Zacek V. Vorel T. Kyd P. Huapaya S. 2010: Mapa Geológico 1: 50 000, hoja Miramar (3246-II), Republica de Costa Rica. – Serv. Geol. Cheko, Praha. ISBN 978-80-7075-743.
5. Žáček, V., Vorel, T., Kycl, P., Huapaya, S., Mixa, P., Grygar, R., Havlíček, P., Čech, S., Hrazdírka, P., Metelka, V., Ševčík, J., & Pécskay, Z. (2011). Geología y estratigrafía de la hoja 3246-ii miramar, costa rica. Revista Geológica De América Central, (47). <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i47.6484>

EIC-Lanamme-INF-0493-2023	Mayo de 2023	Página 44 de 44
---------------------------	--------------	-----------------