



Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: EIC-Lanamme-INF-0560-2023

**Informe de evaluación de los taludes colindantes con el
costado sur y con el costado este del colegio Conservatorio
Castella**



Preparado por:

Ing. Laura Solano Matamoros
Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, DSc.
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica
Mayo, 2023



1. Informe EIC-Lanamme-INF-0560-2023		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Informe de evaluación de los taludes colindantes con el costado sur y con el costado este del colegio Conservatorio Castella.		4. Fecha del Informe 12 de mayo de 2023
5. Organización y dirección 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		
6. Notas complementarias Ninguna		
7. Resumen <i>Por solicitud de la Segunda Vicepresidencia de la República, a continuación, se presenta el resultado de los análisis de estabilidad de los taludes próximos a las instalaciones del colegio Conservatorio Castella, ubicados en el sector sur y noreste, los cuales limitan con el río Virilla y la ruta nacional N°1 respectivamente. Lo anterior con la finalidad de verificar la condición actual de estabilidad del sitio y la posible afectación a las instalaciones del colegio.</i> <i>A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones de la condición actual se destaca que, para las propiedades de los materiales utilizadas (obtenidas de manera preliminar con exploración geotécnica limitada) y las condiciones evaluadas, los resultados de los factores de seguridad fueron favorables y que cumplen con los requisitos de estabilidad definidos por el CGTLCR.</i> <i>Los análisis se realizaron con el Método de Equilibrio Limite (MEL), por lo que se debe tener en consideración que este enfoque ignora el comportamiento de esfuerzo-deformación, el cual se considera importante ejecutar para conocer las deformaciones en el sector del anfiteatro del colegio.</i> <i>Es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos, pero se constituye como un insumo y una guía que pueden ser tomados en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones que pueden sufrir los taludes y las instalaciones del colegio más a fondo. 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, aspecto que se estima importante para evitar la generación de posteriores dificultades en los taludes aledaños.</i>		
8. Palabras clave Modelo de elevación digital, Equilibrio límite, Drenaje natural.	9. Nivel de seguridad: -	10. Núm. de páginas 38
11. Preparado por: Ing. Laura Solano Matamoras. Programa Ingeniería Geotécnica Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, D.Sc Programa Ingeniería Geotécnica		
12. Revisado por: Lic. Nidia Segura Unidad de Asesoría Legal Lic. Giovanni Sancho Coordinador Unidad de Asesoría Legal		13. Revisado y aprobado por: Ana Lorena Monge Sandí, MSc. Coordinadora Programa Ingeniería Geotécnica



Contenido

I.	Introducción.....	6
I.1	Antecedentes.....	7
II.	Descripción general del sitio	8
II.1	Geología local de la zona.....	9
II.1.1	Formación Tiribí.....	10
II.2	Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Heredia	11
II.3	Condición del sitio posterior al deslizamiento	13
III.	Descripción del trabajo realizado	13
III.1	Ensayo de penetración estándar (SPT).....	13
III.1.1	Generalidades	13
III.1.2	Ensayos SPT realizados en el sitio de estudio	15
III.2	Ensayos de laboratorio.....	15
IV.	Resultados obtenidos	16
IV.1	Estratigrafía y tipos de materiales encontrados	16
IV.2	Ensayos de caracterización del material.....	18
IV.2.1	ASTM D2216 Procedimiento para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas	19
IV.2.2	ASTM D4318 Procedimiento para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo	19
IV.2.3	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
IV.2.4	ASTM D6913 Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (utilizando tamices)	20
IV.3	Ensayos de resistencia	21
IV.3.1	ASTM D2166 Ensayo de compresión inconfiada de suelos cohesivos	21
IV.3.2	ASTM D6528 Método estándar de ensayo de corte directo simple para suelos finos consolidado no drenado	21
IV.4	Parámetros geomecánicos obtenidos por correlación con los ensayos SPT	22
IV.5	Modelo geológico-geotécnico del sitio	23
IV.6	Modelo de elevación digital (MED).....	24
V.	Comprobación de estabilidad de los taludes utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL). 27	
V.1	Comprobación de estabilidad del talud 1 ubicado en el sector norte de las instalaciones del colegio Conservatorio Castella en la margen de la RN1	28
V.2	Comprobación de estabilidad del talud 2 ubicado en el sector sur de las instalaciones del colegio Conservatorio Castella en la margen del río Virilla	32

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 3 de 38
---------------------------	--------------	----------------



VI.	Comentarios finales.....	36
VII.	Referencias	37

Figuras

Figura 1.	Fotografía aérea que muestra la explotación del tajo en el año 2010.....	6
Figura 2.	Evidencia de deslizamiento ocurrido en el 2017 en el talud ubicado en el sector sur del colegio Conservatorio Castella.....	7
Figura 3.	Ubicación de la zona de estudio	9
Figura 4.	Mapa geológico local de los alrededores del Conservatorio Castella y la Ruta Nacional 10	
Figura 5.	Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Heredia.....	12
Figura 6.	Esquema del equipo del ensayo SPT	14
Figura 7.	Ubicación espacial de las perforaciones SPT realizadas en la zona de estudio.....	15
Figura 8.	Clasificación de los materiales con la carta de plasticidad de Casagrande	19
Figura 9.	Curva granulométrica, Muestra M-0416-2023	20
Figura 10.	Curva granulométrica, Muestra M-0417-2023	21
Figura 11.	Círculos de Mohr para los resultados del ensayo de corte directo.....	22
Figura 12.	Modelos de elevación digital (MED) de la zona de estudio	25
Figura 13.	Mapa de pendientes y clasificación según Van Zuidam (1986) de la zona de estudio... 26	
Figura 14.	Mapa de pendientes del talud 1, enfatizando en zona de mayor pendiente y secciones a analizar	28
Figura 15.	Análisis de estabilidad utilizando metodología de Bishop para la sección 1-RN1, condición estática y pseudo-estática respectivamente	29
Figura 16.	Análisis de estabilidad utilizando metodología de Bishop para la Sección 2-RN1, condición estática y pseudo-estática respectivamente	30
Figura 17.	Análisis de estabilidad utilizando metodología de Bishop para la Sección 3- río Virilla, condición estática y pseudo-estática respectivamente	31
Figura 18.	Mapa de pendientes del talud 2, enfatizando en zona de mayor pendiente y secciones a analizar	32
Figura 19.	Sección Anfiteatro: modelo geotécnico considerado y factor de seguridad obtenido con el método de Bishop Simplificado para condiciones pseudo-estáticas.	33
Figura 20.	Sección Pabellón F: modelo geotécnico considerado y factor de seguridad obtenido con el método de Bishop Simplificado para condiciones pseudo-estáticas.	34
Figura 21.	Sección Pabellón H: modelo geotécnico considerado y factor de seguridad obtenido con el método de Bishop Simplificado para condiciones pseudo-estáticas.	34
Figura 22.	Sección Mantenimiento: modelo geotécnico considerado y factor de seguridad obtenido con el método de Bishop Simplificado para condiciones pseudo-estáticas.	35
Figura 23.	Sección Longitudinal Deslizamiento: modelo geotécnico considerado y factor de seguridad obtenido con el método de Bishop Simplificado para condiciones pseudo-estáticas.....	35

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 4 de 38
---------------------------	--------------	----------------



Tablas

Tabla 1. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 1 / M-0416-2023.....	17
Tabla 2. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 2 / M0417-2023	17
Tabla 3. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 3 / M0418-2023	18
Tabla 4. Resumen de estratos encontrados con las perforaciones SPT.....	18
Tabla 5. Contenido de humedad de suelos y rocas, muestras indicadas	19
Tabla 6. Resultados del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad	19
Tabla 7. Clasificación del material.....	20
Tabla 8. Porcentaje de material más fino que el tamiz de 75 µm (N° 200)	20
Tabla 9. Resultados del ensayo compresión confinada de suelos cohesivos	21
Tabla 10. Resultados corte directo.....	22
Tabla 11. Parámetros geomecánicos obtenidos a partir de las correlaciones con el ensayo SPT ..	23
Tabla 12. Modelo geotécnico del sitio de estudio	24
Tabla 13. Clases de pendientes, condiciones del terreno y colores sugeridos	26
Tabla 14. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en secciones del Talud 1.....	31
Tabla 15. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en secciones del Talud 2.....	36



Informe de evaluación de los taludes colindantes con el costado sur y con el costado este del colegio Conservatorio Castella

I. Introducción

En este informe se presentan los resultados del análisis de estabilidad del talud sur del colegio Conservatorio Castella colindante con el cauce del río Virilla y el talud colindante con la Ruta Nacional 1 (RN1), pues dadas sus condiciones actuales resultantes del desprendimiento de material ocurrido el 07 de setiembre del año 2017, se pretende verificar la influencia de los mismos sobre las instalaciones del colegio, ya que en aquel acontecimiento se deshabilitó el uso de la zona del anfiteatro debido a su proximidad con la corona del deslizamiento.

La zona en la que ocurrió el deslizamiento consiste en un terreno que según los registros históricos de Google Earth (ver Figura 1) y la documentación existente, ubicaba un tajo para la extracción de material para agregados de construcción en el talud colindante con el sector sur de las instalaciones del Colegio. Luego de la finalización de la explotación del sitio, se rellenó con material de desecho y materiales de excavaciones de otros sitios, dando como resultado la conformación de un perfil geotécnico muy heterogéneo, con propiedades geomecánicas variables y poco favorables para la estabilidad del talud. Aunado a esto, la conformación final del sitio no contó con adecuados sistemas de manejo de aguas de escorrentía superficial y control de erosión, dando como resultado una zona susceptible a la inestabilidad de materiales.



Figura 1. Fotografía aérea que muestra la explotación del tajo en el año 2010
Fuente: Google Earth



Para el análisis del sitio el Programa de Ingeniería Geotécnica (PIG) del LanammeUCR, realizó tres visitas de campo con el fin de conocer y caracterizar el lugar partiendo del criterio especializado en geotecnia. En una primera visita se realizó una evaluación visual del terreno, en la cual se identificaron las zonas críticas y los insumos requeridos para la conformación del modelo geotécnico preliminar del sitio. En la segunda visita se realizó el levantamiento con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para digitalizar la morfología actual del lugar y, además, se realizó un muestreo superficial en el sector sur de las instalaciones del colegio. Finalmente se realizó una tercera visita en la que se ejecutaron perforaciones SPT con una profundidad promedio de 4,5 m, para la conformación del perfil geotécnico del sitio, las cuales se describen con mayor detalle en este informe.

I.1 Antecedentes

La zona de interés consiste en un terreno donde a lo largo de varios años se realizó la extracción de materiales para agregados de construcción. Una vez que estas actividades de excavaciones terminaron pareciera ser que se continuó trabajando en un relleno del sitio con materiales heterogéneos compuestos por desechos de materiales de diferentes geologías, el cual carecía de un diseño apropiado por lo que no se verificó el grado de compactación de este y se obvió un sistema adecuado de manejo de aguas de escorrentía superficial.

Según los informes IAR-INF-0860-2017 y CNE-UIAR-INF-0310-19 elaborados por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), durante los días 29, 30 y 31 de agosto de 2017, el paso de la Onda Tropical número 37 de ese año generó precipitaciones intensas hacia el este del Valle Central que, según los datos del Instituto Meteorológico Nacional, permitió la acumulación de al menos 100 mm de precipitaciones durante un periodo de 6 horas. Esta condición de altas precipitaciones sostenida en el tiempo mantuvo los suelos altamente saturados y favoreció que se presentaran diversos incidentes de deslizamientos en los alrededores del Valle Central. Entre ellos, se presentó el deslizamiento ocurrido el 01 de setiembre en el margen derecha del río Virilla, detrás de las instalaciones del Colegio Castella, como se observa en la Figura 2. Según las estimaciones realizadas por la CNE, la masa inestable y deslizada representó un volumen de aproximadamente 136740 de metros cúbicos de material.



Figura 2. Evidencia de deslizamiento ocurrido en el 2017 en el talud ubicado en el sector sur del colegio Conservatorio Castella

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 7 de 38
---------------------------	--------------	----------------



Según el mapa de amenazas potenciales de la CNE, la zona de estudio no está localizada dentro de alguna de las zonas con afectación directa por amenazas naturales predecibles. No obstante, los informes IAR-INF-0860-2017 y CNE-UIAR-INF-0310-19, indicaron que la escala de estos mapas no permite obtener informaciones detalladas del sitio de interés, salvo que esta zona presenta fuertes pendientes en ambas márgenes.

Es importante mencionar que el informe CNE-UIAR-INF-0310-19 corresponde a una visita de seguimiento realizada el 10 de mayo de 2019, con la finalidad de realizar un monitoreo de las condiciones de estabilidad en la zona deslizada y cercana a la corona del deslizamiento registrado el 01 de setiembre de 2017, para valorar la susceptibilidad al deslizamiento del entorno. Entre las conclusiones obtenidas en este informe se destaca que la zona deslizada en 2017 recuperó su equilibrio y estabilidad, y no fueron observadas evidencias de crecimiento del área inestable, ni cicatrices de desprendimientos recientes en el plano del deslizamiento, indicando que en el sector evaluado no se habían presentado nuevos deslizamientos de material.

Es importante destacar que en el informe IAR-INF-0860-2017, presentado en setiembre del 2017, la CNE recomendó a la Junta Administradora del Centro Educativo realizar un adecuado sistema de canalización y manejo de aguas pluviales y de escorrentía superficial, las cuales no eran colectadas en los alrededores del deslizamiento, con la finalidad de que las aguas no fueran descargadas directamente a los sitios que presentaban desprendimientos, agrietamientos y evidencias de inestabilidad.

No obstante, en el informe CNE-UIAR-INF-0310-19, de junio de 2019, se indica que todavía se continúa observando un mal manejo de las aguas pluviales con ausencia de elementos de canalización y adecuados sistemas de desfogue, así como la ausencia de canoas y bajantes en los techos de las instalaciones. Estas condiciones favorecen la erosión, humedad permanente en los sectores inestables, lo cual se podía evidenciar con la presencia de grietas en el suelo, deformación de aceras, paredes y muros producto de posibles asentamientos diferenciales del suelo y el relleno.

Así pues, en el informe del 2019 la CNE recomendó nuevamente a la Administración del Centro Educativo realizar un adecuado sistema de recolección, canalización y manejo de las aguas pluviales y de escorrentía superficial en los alrededores del deslizamiento e infraestructura central, para que estas no fueran descargadas directamente en los sitios que presentan desprendimientos, agrietamientos o evidencias de inestabilidad. Así como también, efectuar la construcción de sistemas de drenaje en cualquier zona donde se pueda producir estancamientos de agua superficial en la masa del relleno.

II. Descripción general del sitio

El sitio de análisis se ubica en la provincia de Heredia, específicamente las zonas de estudio se conforman por los taludes ubicados al norte y sur de las instalaciones del Colegio Conservatorio Castella, los cuales limitan con la ruta nacional 1 (RN1) y el cauce del río Virilla respectivamente. En la Figura 3 se ubica la zona de estudio y se resaltan la ubicación del cauce del río Virilla y la RN1 para la mejor interpretación de los sitios que se analizan en este documento.

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 8 de 38
---------------------------	--------------	----------------

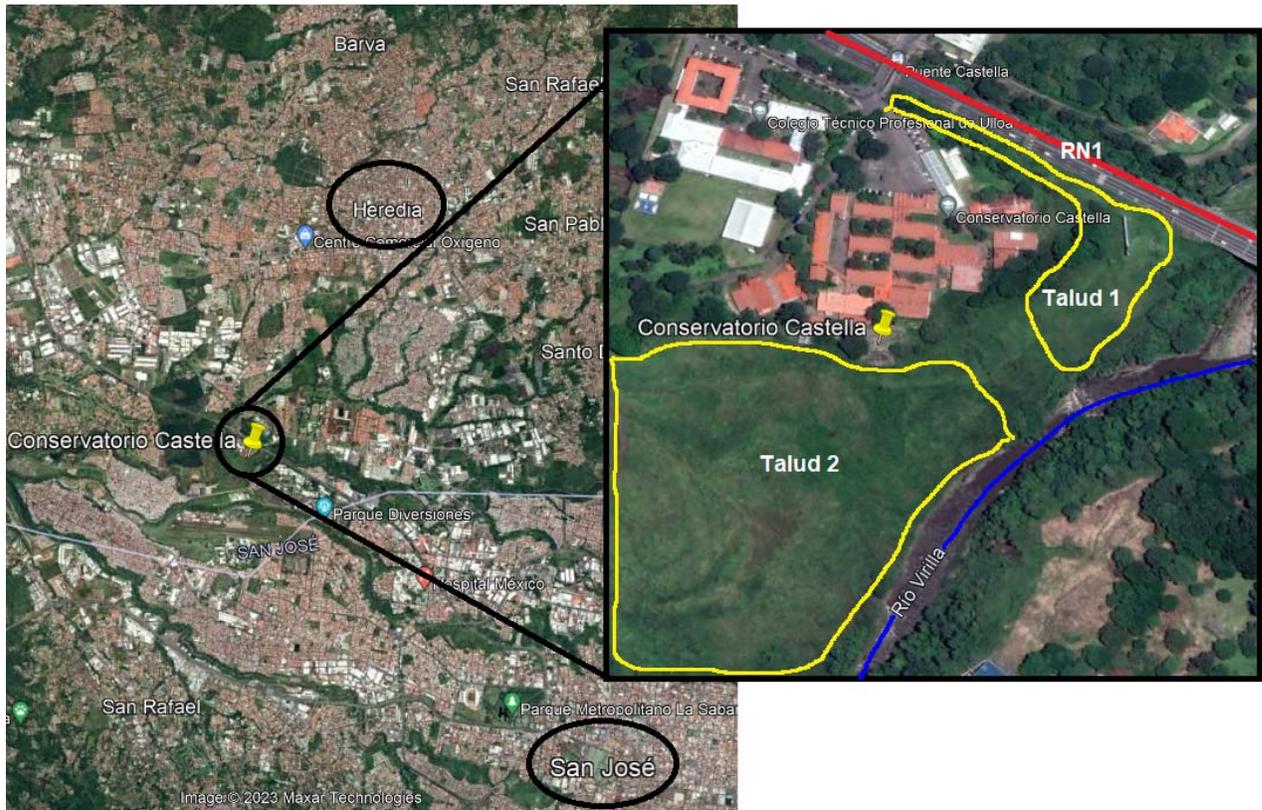


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio

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 de la zona

La formación geológica que aflora en las cercanías del puente del Río Virilla de la RN1y el Conservatorio Castella corresponde con: La Formación Tiribí. Los materiales que componen el deslizamiento ocurrido en el sector sur del Conservatorio Castella son rellenos antrópicos que fueron colocados a lo largo de los años en una zona que funcionó anteriormente como tajo de donde se extrajo material de la Formación Tiribí. En la Figura 4 se presenta el mapa geológico local de la zona de estudio de este informe.

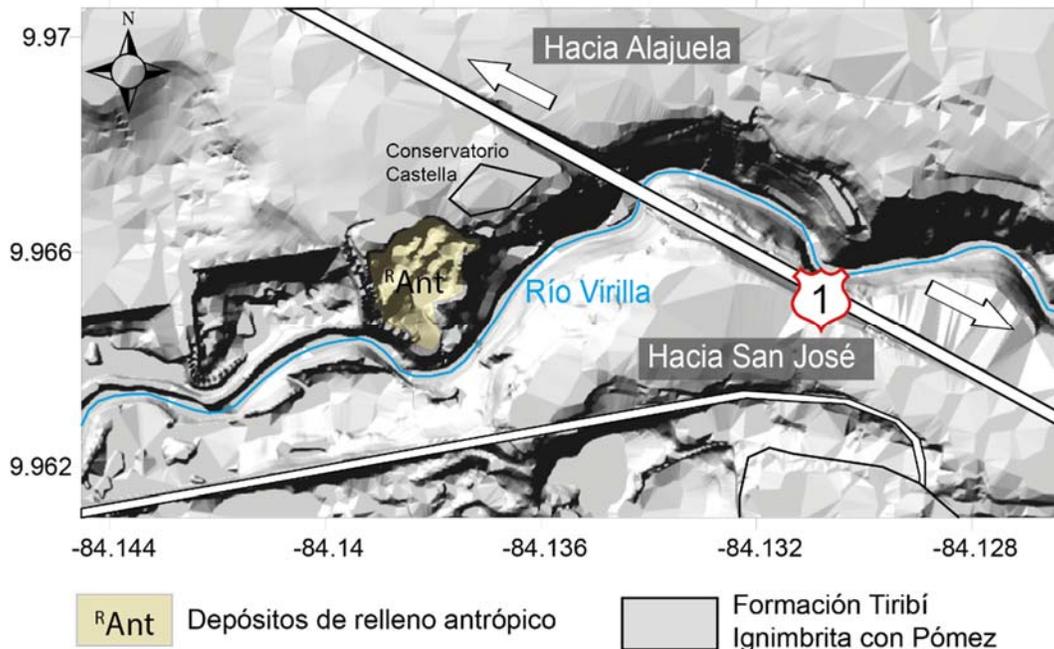


Figura 4. Mapa geológico local de los alrededores del Conservatorio Castella y la Ruta Nacional 1

II.1.1 Formación Tiribí

Son ignimbritas que han dejado una topografía casi plana y característica, reconocible en muchas zonas del Valle Central. Se encuentran al pie de los volcanes de la Cordillera Central, al menos hasta 75 km al oeste hasta la costa pacífica (cf. Pérez, 2000). Afloran principalmente en cortes de camino y quebradas a lo largo de la cuenca del río Virilla y en sus cañones, así como en varios tajos donde se han expuesto para la explotación de sus materiales. Numerosos pozos perforados también exponen su secuencia (Ruiz y Soto, 2014).

Se inicia con una capa de caída de pómez pliniana, sobreyacente sin paleosuelo sobre las brechas y lavas de Colima Superior (espesores varían desde 0,5 m en Ciudad Colón hasta 3 m al sur y sureste de Heredia). La interpretación de Pérez (2000), con base en una interpolación de isopacas, es que se originó en el borde sur de la supuesta Caldera de Barva y se desperdigó con un eje SSW. Sobreyace a las formaciones Pacacua, Grifo Alto, Zurquí y Colima, y subyace a las formaciones Lavina y Barva y los depósitos coluvio-aluviales. Ninguna de estas formaciones aflora cerca del Conservatorio Castella, según el mapa geológico de la Hoja Abra escala 1: 50 000 de Denyer y Arias 1991. La formación Tiribí, tiene espesores de hasta 30 metros en el Tajo Guacalillo y según Pérez (2000), de hasta 40 m en el área de Electriona.

El volumen de las ignimbritas de Tiribí había sido calculado por Kussmaul (1988) y fue recalculado por Pérez (2000) en los mismos 25 km³. Kutterolf et al. (2008) recalcularon cerca de 80 km³, y Soto et al. (2008) han propuesto que puede alcanzar los 100 km³. Sobreyace a la unidad epiclástica de Colima (Miembro Colima Superior) sobre la RN-27, o bien a los otros miembros de Colima fuera de la carretera, e incluso a las volcanitas y sedimentitas más antiguas. Aparece en el cañón del Virilla con columnas de enfriamiento y en muchos sectores de las rutas RN-27, Radial Lindora-Belén, Ruta Nacional 1 y aledaños. Las nuevas edades dadas por Pérez (2000), de 0,33 Ma y las mejores de Pérez et al. (2006) de 322 mil años para estas ignimbritas, parecen confirmadas por Marshall et al. (2003), quienes publican cuatro nuevas dataciones: 320 ± 10 ka, 331 ± 23 ka, 373 ± 19 ka y 390 ±

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 10 de 38
---------------------------	--------------	-----------------



17 ka. Concuerdan perfectamente con las edades consignadas de 330 ka para la subyacente Colima Superior, con un lapso sin paleosuelos entre esta y Tiribí. Pérez (2000) ha reinterpretado que ocurrió en la cima del Barva, y cuya evacuación luego originaría la caldera mayor del Barva (hoy rellena y erosionada en parte).

II.2 Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Heredia

La zona de interés se ubica en la provincia de Heredia en el cantón de Ulloa. El terreno presenta una topografía ondulada con pendientes medias a fuertes, inclinadas hacia el cauce del río Virilla y RN1 respectivamente.

En cuanto a las amenazas que posee la zona en estudio, en la Figura 5 se presenta el mapa de amenazas y peligros naturales, elaborado por la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) para el cantón de Heredia. Se muestra un acercamiento a la zona donde se ubica el sitio de análisis, en el cual se puede observar la influencia dada la cercanía de la zona a amenazas por fallas del cuaternario, colada de lava de los Ángeles, ríos y quebradas. Así como la presencia del trazado de un poliducto.

De acuerdo con la CNE, el terreno evaluado no se encuentra dentro de alguna zona con afectación directa por amenazas naturales predecibles. Sin embargo, sí se evidencian taludes de pendientes pronunciadas que no favorecen la estabilidad del sitio. Además, el área de interés se ubica dentro de la cuenca del río Virilla, en la margen derecha y al norte limita con la Ruta Nacional 1 (RN1).

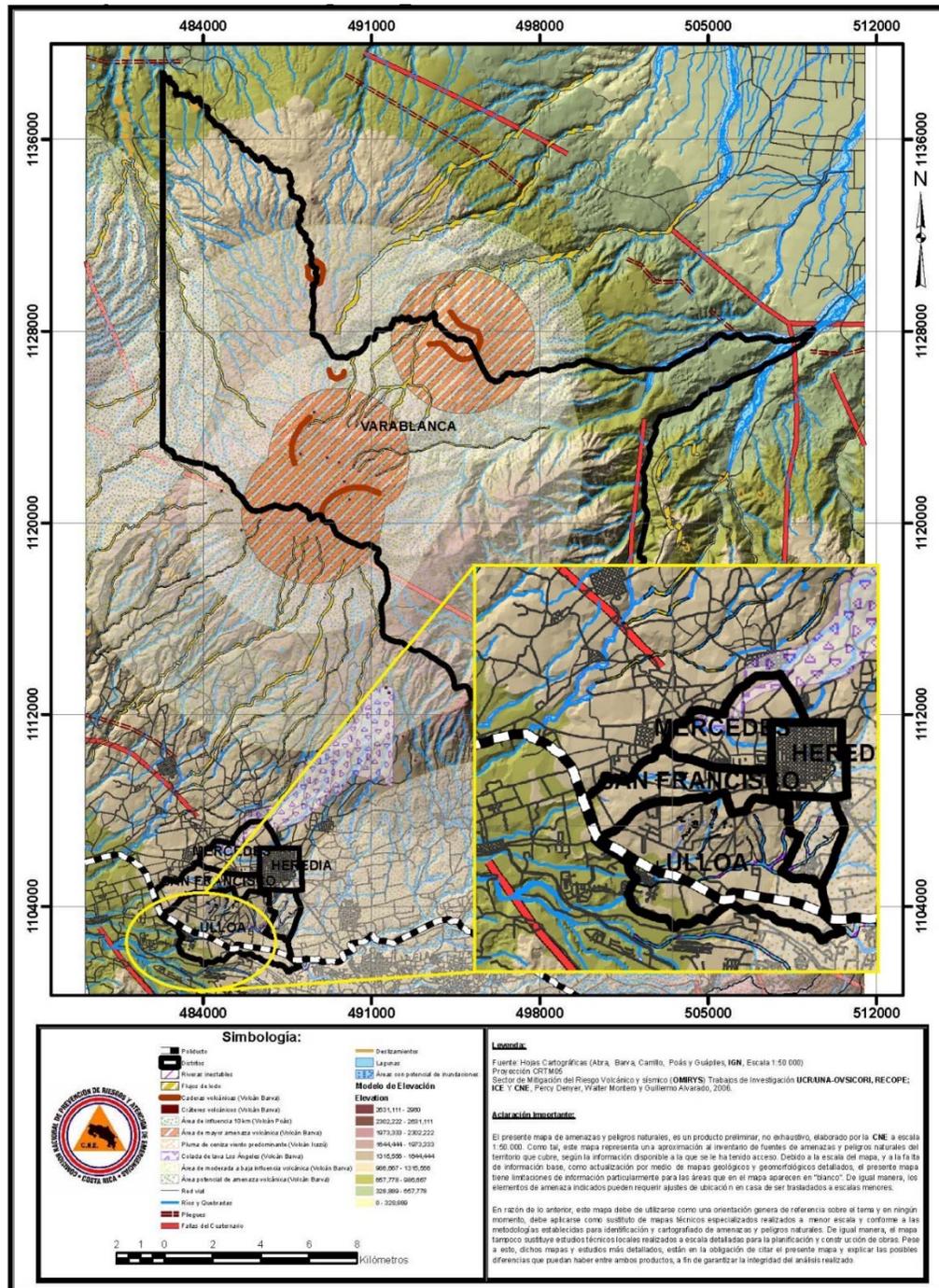


Figura 5. Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Heredia



II.3 Condición del sitio posterior al deslizamiento

Tal como se indica anteriormente, el informe CNE-UIAR-INF-0310-19, realizado por la CNE en julio del 2019, aparentemente la zona deslizada en 2017 recuperó su equilibrio y estabilidad, ya que no fueron observadas nuevas evidencias de crecimiento del área inestable, ni cicatrices de desprendimientos recientes en el plano del deslizamiento, indicando que en el sector evaluado no se han presentado nuevos deslizamientos de material.

Las observaciones anteriores fueron corroboradas en tres visitas al sitio realizadas por parte del Programa de Ingeniería Geotécnica del LanammeUCR durante los meses de febrero y marzo del 2023. Así pues, tal como se indicó anteriormente, en la primera visita se realizó una evaluación visual del sitio, en la cual se identificaron las zonas críticas. En la segunda visita se realizó el levantamiento del sitio con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para digitalizar la morfología actual del sitio y, finalmente, en la tercera visita se ejecutaron perforaciones SPT para la conformación del perfil geotécnico.

III. Descripción del trabajo realizado

Teniendo en consideración la situación actual del sitio, donde existe el registro de un evento de inestabilidad ocurrido el 01 de setiembre de 2017 en la margen derecha del río Virilla detrás de las instalaciones del Colegio Castella, y que según las estimaciones realizadas por la CNE, la masa inestable representa un volumen considerable de material de aproximadamente 136740 metros cúbicos, y debido a su proximidad al centro educativo del Conservatorio Castella el Programa de Ingeniería Geotécnica del LanammeUCR procedió a realizar los análisis que se muestran en el presente informe.

Adicionalmente, para poder plantear el modelo geológico – geotécnico del sitio necesario para realizar los análisis anteriormente mencionados, se procedió a realizar una exploración geotécnica básica, preliminar y limitada a condiciones propias del equipo, además de ensayos de laboratorio para establecer las propiedades de los materiales presuntamente encontrados en sitio durante los ensayos de campo. Ambas campañas de ensayos se describen a continuación.

III.1 Ensayo de penetración estándar (SPT)

III.1.1 Generalidades

El ensayo de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés), es el método de ensayo in situ más utilizado para muestrear y caracterizar el material de un sitio en estudio, y que mediante cálculos indirectos permite obtener la capacidad de soporte del medio.

El ensayo consiste en establecer el número de golpes que se requieren para que un barril con un muestreador partido se introduzca en el terreno a una profundidad determinada, dejando caer un martillo con una masa estándar. En Costa Rica, se utiliza el procedimiento del método de ensayo especificado por la ASTM D1586, donde se establece que la masa del martillo es de 63.5 kg, la altura de caída es de 760 mm, el diámetro del muestreador es de 50 mm y la profundidad para determinar el número de golpes por cada capa es de 45 cm. El esquema de la Figura 6 muestra el equipo utilizado en este ensayo:

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 13 de 38
---------------------------	--------------	-----------------

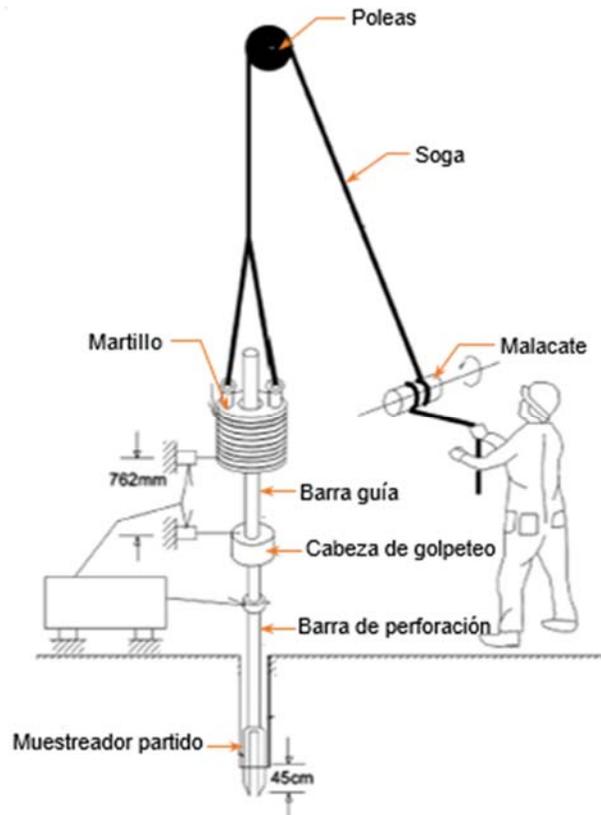


Figura 6. Esquema del equipo del ensayo SPT
Fuente: Schaind (2009)

Estos ensayos son aplicables a suelos que son relativamente blandos y no se puede realizar cuando se encuentran suelos firmes o basamentos rocosos, puesto que en estos materiales se generan un rebote, con lo cual ya no se reporta un número de golpes para penetrar el material. En estas condiciones, es posible indicar que el ensayo terminó. La norma ASTM D1586, establece que el rebote se alcanza cuando se presenta alguna de las siguientes situaciones:

- Un total de 50 golpes durante cualquiera de los tres incrementos de 15 cm que componen los tramos de 45 cm de la profundidad de avance
- Si se aplicaron 100 golpes en total
- No se observa avance del muestreador durante la aplicación de 10 golpes sucesivos del martillo.
- El muestreador avanza los 45 cm de la profundidad de avance sin que ocurran los conteos de golpes limitantes como los descritos anteriormente
- Si el muestreador se hunde bajo el peso del martillo, el peso de barras de perforación o ambos, se registra la longitud del recorrido. Si el muestreador se hunde durante todo el intervalo, se detiene el ensayo, se retiran el muestreador y las barras de perforación y se avanza a través de los materiales muy blandos o sueltos hasta la siguiente profundidad de muestreo. Se registra el valor N como peso del martillo, peso de las barras o ambos.

Mediante los resultados alcanzados por este ensayo, es posible obtener de manera indirecta, a través de correlaciones, los parámetros mecánicos de resistencia de los materiales del sitio. Entre los parámetros que se pueden determinar se encuentran la resistencia al corte no drenado (SU) para

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 14 de 38
---------------------------	--------------	-----------------

suelos arcillosos, ángulo de fricción interno efectivo (ϕ') e incluso la capacidad de carga admisible (Q_{adm}).

III.1.2 Ensayos SPT realizados en el sitio de estudio

Para este trabajo en específico, se realizan 3 ensayos de SPT, cuya ubicación se muestra en la Figura 7. La perforación 1 se realizó hasta una profundidad de 3,6 m, la perforación 2 alcanzó una profundidad de 5,40 m y la perforación 3 alcanzó una profundidad de 4,95 m, en cada una de las perforaciones se aplicó el criterio de la norma ASTM D1586 para finalizar el ensayo.



Figura 7. Ubicación espacial de las perforaciones SPT realizadas en la zona de estudio

III.2 Ensayos de laboratorio

De las perforaciones anteriormente descritas y con ayuda del tubo muestreador, es posible extraer muestras para ensayos de laboratorio, que permiten caracterizar los materiales encontrados y relacionarlos con los resultados del ensayo in situ.

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-INF-0502-2023.

A continuación, se realiza la descripción de las muestras, para los análisis se debe tener en consideración que las muestras tomadas provienen de las perforaciones SPT.

- **Muestra M-0416-2023**

Se compone de 8 bolsas con suelo provenientes de la P1; SPT#1

- **Muestra M-0417-2023**

Se compone de 12 bolsas con suelo provenientes de la P2; SPT#2

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 15 de 38
---------------------------	--------------	-----------------



- **Muestra M-0418-2023**

Se compone de 11 bolsas con suelo provenientes de la P3; SPT#3

A las muestras tomadas en 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 el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo (ASTM D4318)
- Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión confinada de suelos cohesivos (ASTM D 2166)
- 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)

Con los resultados de estos ensayos, fue 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.

Es importante tener en consideración que la caracterización geomecánica realizada para este sitio de estudio es general y preliminar, donde 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 y tampoco tienen la intención 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 de referencia para llevar a cabo análisis más exhaustivos.

IV. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos de los ensayos de campo, así como los realizados en laboratorio tanto de caracterización como de resistencia, se muestran en los siguientes apartados. Asimismo, se muestra el producto de compatibilizar los resultados de ambos ensayos en un modelo geológico – geotécnico del sitio, insumo indispensable para realizar los análisis de estabilidad que se muestran posteriormente.

IV.1 Estratigrafía y tipos de materiales encontrados

Como se mencionó en apartados anteriores, se realizaron 3 perforaciones hasta alcanzar el criterio de norma para finalizar el ensayo. Las perforaciones se ubican en diferentes puntos y a diferentes elevaciones del terreno, lo que permite complementar los resultados entre sí para conformar la estratigrafía representativa del sitio.

Los materiales encontrados en las perforaciones se encuentran descritos en la Tabla 1,

Tabla 2 y Tabla 3, para cada perforación respectivamente.

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 16 de 38
---------------------------	--------------	-----------------



Tabla 1. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 1 / M-0416-2023

Profundidad (cm)	Descripción de campo	N° de golpes (promedio)
0,0-45	Suelo limoso arcilloso color café oscuro con raíces finas y limo orgánico, pequeños fragmentos de ladrillo.	8
45-90	Material combinado de suelo limoso arcilloso café oscuro con bloques de suelo amarillento, material muy compacto	13
90-135	Suelo limo areno-arcilloso color café claro amarillento, con poco rastro de limo oscuro, muy compacto en las primeras 2 capas del estrato y luego se nota más suelto, presenta partículas de roca semi-compacta.	15
135-180		
180-225		
225-270		
270-315	Material o estrato rocoso-arenoso-limoso color gris claro, suelto con partículas rocosas degradables de baja plasticidad.	82
315-360		

Tabla 2. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 2 / M0417-2023

Profundidad (cm)	Descripción de campo	N° de golpes (promedio)
0,0-45	Suelo limoso arcilloso color café rojizo oscuro con vetas amarillentas, muy compacto en las 2 primeras capas y más blando al final del estrato.	26
45-90		
90-135		
135-180	Estrato de material lastroso grisáceo con bloquecillos de suelo MH en poca cantidad. Roca compacta y semicompacta de hasta 25,4 mm de diámetro. Nota: Dentro la profundidad 180 cm a 225 cm no se recuperó muestra.	14
180-225		
225-270		
270-315	Suelo limoso arcilloso color café oscuro amarillento muy compacto, presenta ligeras partículas rocosas medianas poco compactas a lo largo del estrato.	18
315-360		
360-405		
405-450	Prácticamente no se recuperó material, solo dos aisladas partículas de roca pequeñas, en la profundidad de 450 cm a 495 cm.	57
450-495		
495-540		



Tabla 3. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 3 / M0418-2023

Profundidad (cm)	Descripción de campo	N° de golpes (promedio)
0,0-45	Material lastroso grisáceo, poco compacto, con ligeros bloques de suelo limoso color café oscuro con raíces finas.	10
45-90	Suelo limoso arcilloso color oscuro (negruzco) tipo orgánico, poco compacto, prevalece este suelo hasta (45 cm a 125 cm aproximadamente). Con poco rastro de lastre al inicio y bloques de suelo café claro amarillento muy compacto al final del estrato.	10
135-180	Suelo limoso arcilloso color café claro amarillento con vetas de limo café oscuro, bloques semicompactos con rastros de lastre sobre todo al inicio del estrato. Se nota cierta degradación del material.	7
180-225		
225-270		
270-315	Suelo limoso arcilloso color café claro amarillento con ligeras vetas limosas oscuras, poco compactas, algo meteorizado, sobre todo hasta 360 cm aproximadamente. (Se nota más natural el suelo), ligeras vetas gris claro.	12
315-360		
360-405	Suelo limoso arcilloso color café oscuro, algo blando en primera capa y muy compacto a partir de 405 cm, mostrándose mucho más compacto de 450 cm a 465 cm. Donde se aplica criterio de norma para finalizar ensayo.	28
405-450		
450-495		

Como se puede observar, preliminarmente se han encontrado 3 tipos de material, según las descripciones dadas, se muestra de manera simplificada en la Tabla 4

Tabla 4. Resumen de estratos encontrados con las perforaciones SPT

Profundidad aproximada (m)	Descripción de campo	N° de golpes (promedio)	Capa
0-3	Material combinado de suelo limoso arcilloso café oscuro con bloques de suelo amarillento, material muy compacto	0-15	1
3-8	Suelo limoso arcilloso color café oscuro amarillento muy compacto, presenta ligeras partículas rocosas medianas poco compactas a lo largo del estrato	15-35	2
8-15	Material o estrato rocoso-arenoso-limoso color gris claro, suelto con partículas rocosas degradables de baja plasticidad	35-57	3
>15	Rebote	>57	

IV.2 Ensayos de caracterización del material

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



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

El contenido de humedad de los materiales muestreados se presenta a continuación.

Tabla 5. Contenido de humedad de suelos y rocas, muestras indicadas

Muestra	Humedad natural (%)
M-0416-2023	33,24
M-0417-2023	30,21
M-0418-2023	35,65

Como puede observarse, los contenidos de humedad de los materiales son cercanos entre sí, por lo que se presume que los materiales cuentan con una condición de homogeneidad en el sitio.

IV.2.2 ASTM D4318 Procedimiento para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo

Los límites de Atterberg encontrados en los distintos materiales muestreados son los siguientes:

Tabla 6. Resultados del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad
M-0416-2023	30,0	26,0	4,0
M-0417-2023	50,5	30,0	20,5
M-0418-2023	45,5	30,5	15,0

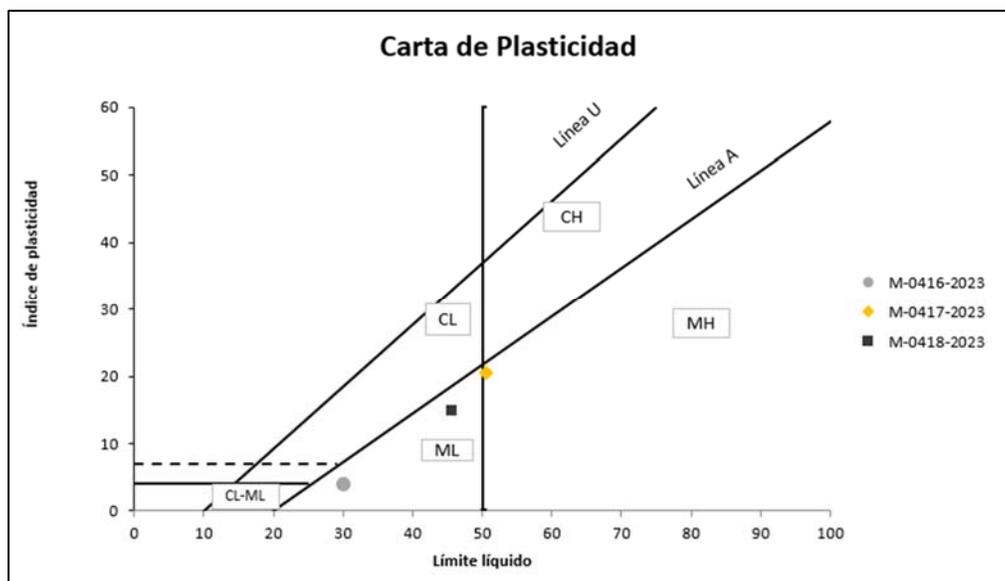


Figura 8. Clasificación de los materiales con la carta de plasticidad de Casagrande

Dadas las características de plasticidad de estos materiales y según los resultados que se observan de su ubicación en la carta de plasticidad mostrada en la Figura 8, los materiales se clasifican de la siguiente manera:

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 19 de 38
---------------------------	--------------	-----------------



Tabla 7. Clasificación del material

Muestra	Clasificación
M-0416-2023	ML
M-0417-2023	MH
M-0418-2023	ML

Como puede observarse, todos los materiales clasifican como limos de media a baja plasticidad.

IV.2.3 ASTM D1140 Métodos de ensayo estándar para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz 75 μm (N° 200) en suelos mediante lavado

Tabla 8. Porcentaje de material más fino que el tamiz de 75 μm (N° 200)

Muestra	Material más fino que 75 μm (%)
M-0416-2023	64,4
M-0417-2023	63,5
M-0418-2023	76,6

IV.2.4 ASTM D6913 Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (utilizando tamices)

A continuación, se muestra la distribución del tamaño de partículas que conforman las muestras M-0416-2023 y M-0417-2023, en el caso de la muestra M-0418-2023 no fue posible recuperar la cantidad de material mínima requerida en la norma ASTM D6913 para realizar el análisis granulométrico.

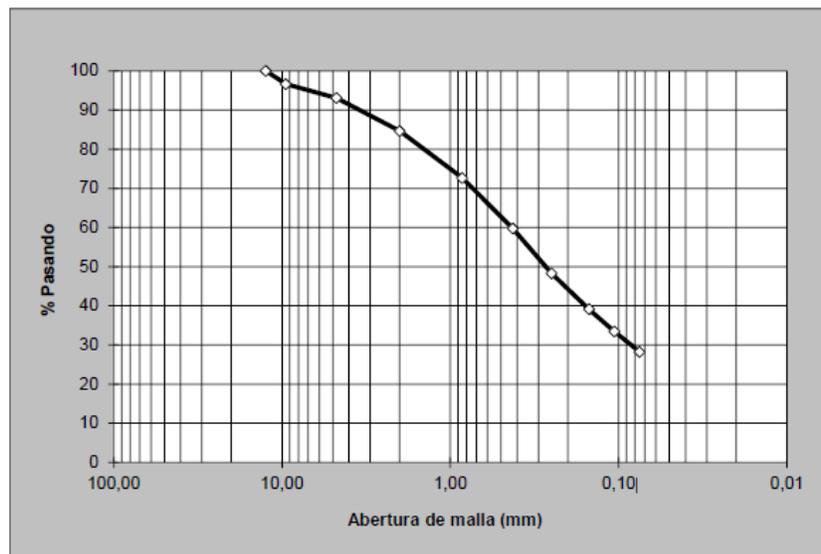


Figura 9. Curva granulométrica, Muestra M-0416-2023

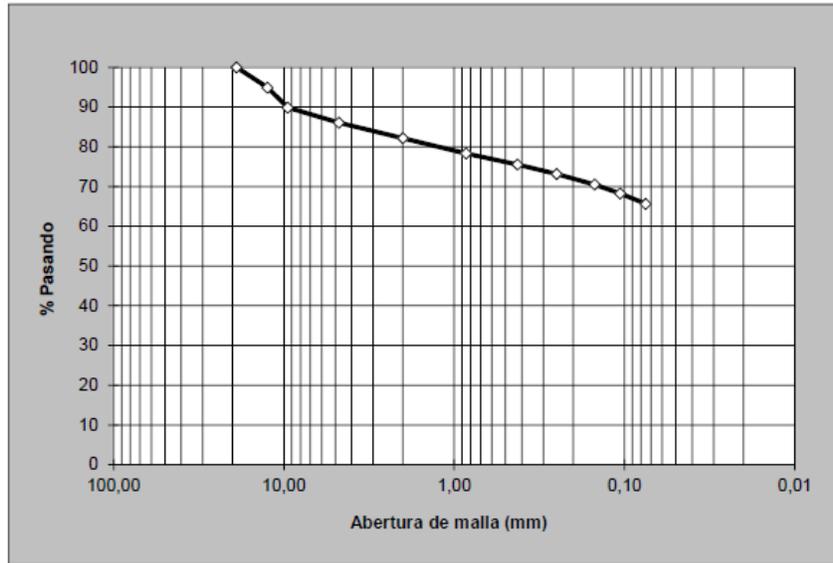


Figura 10. Curva granulométrica, Muestra M-0417-2023

IV.3 Ensayos de resistencia

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

IV.3.1 ASTM D2166 Ensayo de compresión inconfiada de suelos cohesivos

Para el ensayo de compresión inconfiada, solo fue posible extraer un espécimen de la muestra M-0416-2023, cuyo resultado se expone a continuación. Este resultado, se asocia con la capa ubicada a una profundidad de 1,80 m, con 15 golpes SPT asociados y que se describe como Suelo limo arenoso color café claro amarillento en la estratigrafía mostrada en la Tabla 1.

Tabla 9. Resultados del ensayo compresión inconfiada de suelos cohesivos

Muestra	Esfuerzo de compresión máximo (kPa)	Resistencia al cortante (kPa)
M-0416-2023	81	41

IV.3.2 ASTM D6528 Método estándar de ensayo de corte directo simple para suelos finos consolidado no drenado

En este caso, se contó con dos muestras, las cuales representan respectivamente la capa superior hasta una profundidad de 2,70 m descrita en la Tabla 1 y la capa intermedia que va desde una profundidad de 3,15 m hasta 4,50 m descrita en la Tabla 3.

Tabla 10. Resultados corte directo

Muestra	Carga Normal (N)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
M-0416-2023	46	52	118,5
	92	101	159,9
	183	199	273,1
M-0418-2023	46	52	103,3
	92	101	152,7
	183	199	209,7

En la Figura 11 se muestra de manera gráfica los resultados obtenidos en el ensayo de corte directo siguiendo la metodología de Mohr Coulomb.

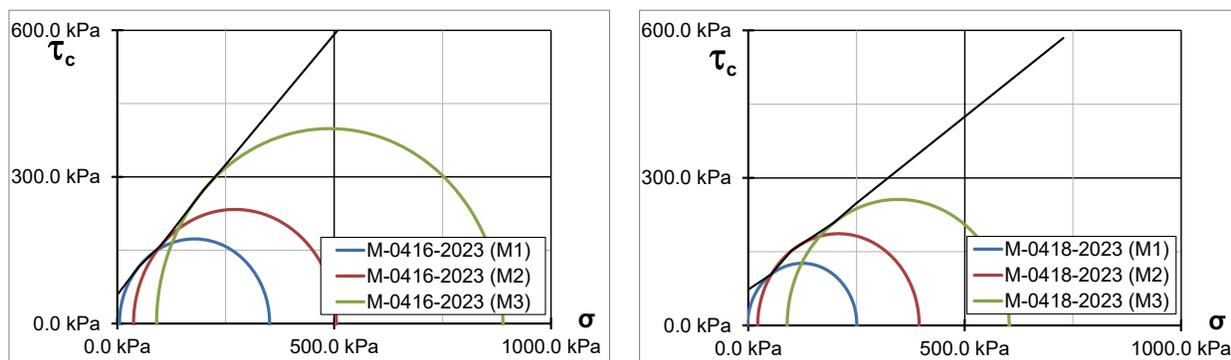


Figura 11. Círculos de Mohr para los resultados del ensayo de corte directo

IV.4 Parámetros geomecánicos obtenidos por correlación con los ensayos SPT

Mediante los resultados obtenidos por el ensayo de SPT, es posible obtener de manera indirecta a través de correlaciones las propiedades geomecánicas de los materiales. Entre los parámetros que se pueden determinar se encuentran la resistencia al corte no drenado (SU) para suelos arcillosos, ángulo de fricción interno efectivo (Φ') e incluso la capacidad de carga admisible (q_{adm}). Para cada uno de estos parámetros, existen varias fórmulas que las correlacionan, correspondiente a diversas investigaciones realizadas. Las correlaciones utilizadas para este informe son las que se mencionan a continuación.

- Ángulo de fricción

Existen varias correlaciones para el valor del ángulo de fricción efectivo para suelos granulares. Una de estas que no contempla la determinación de otros parámetros que no estén relacionados con el ensayo de SPT es la dada por la relación gráfica que determinaron Peck, Hanson y Thornburn en 1974, y que WolfF en 1989 representó mediante la expresión de la ecuación 1:

$$\phi' = 27,1 + 0,3(N_1)_{60} - 0,00054[(N_1)_{60}]^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60}$$

$$C_N = \left(\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma_{adm}} \right)^{-0,5} \quad \text{Roberton, et al (2000)}$$



- Cohesión

Al igual que para el ángulo de fricción, existen varias correlaciones que se pueden realizar empleando los resultados del ensayo de SPT para determinar la cohesión del suelo. En este caso, la correlación utilizada está dada por la ecuación 2, la cual fue propuesta por Stroud (1974):

$$C_u = K \times N_{60} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

K= es una constante entre 3,5 a 6,5 kN/m² y cuyo valor utilizado es 5,6 kN/m²

Los resultados de la aplicación de estas correlaciones se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 11. *Parámetros geomecánicos obtenidos a partir de las correlaciones con el ensayo SPT*

Capa	Profundidad aproximada (m)	Descripción de campo	N° de golpes (promedio)	γ (kN/m ³)	C (kPa)	φ (°)
1	0-3	Material combinado de suelo limoso arcilloso café oscuro con bloques de suelo amarillento, material muy compacto	0-15	14,8	57,9	30,0
2	3-8	Suelo limoso arcilloso color café oscuro muy compacto, presenta partículas rocosas medianas a lo largo del estrato	15-35	16,3	110,3	32,8
3	8-15	Material o estrato rocoso color gris claro	35-57	20,0	305,2	41,8
	>15	Rebote	>57			

IV.5 Modelo geológico-geotécnico del sitio

En la presente sección se muestra la determinación de las capas que conforman el perfil estratigráfico del sitio de análisis y los parámetros geomecánicas a utilizar para los respectivos análisis, provenientes del análisis de los resultados obtenidos tanto en los ensayos de campo como de laboratorio.

Utilizando como base la información dada en los apartados anteriores, se realiza un análisis de la totalidad de la información, estableciendo con el criterio geotécnico de los profesionales especialistas del Programa de Ingeniería Geotécnica del LanammeUCR el modelo geotécnico del sitio a utilizar en los análisis de estabilidad, el mismo que se describe en la Tabla 12.



Tabla 12. Modelo geotécnico del sitio de estudio

Capa	Profundidad aproximada (m)	Descripción de campo	N° de golpes (promedio)	γ (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)
1	0-3	Material combinado de suelo limoso arcilloso café oscuro con bloques de suelo amarillento, material muy compacto	0-15	14,8	58,0	30,0
2	3-8	Suelo limoso arcilloso color café oscuro muy compacto, presenta partículas rocosas medianas a lo largo del estrato	15-35	16,3	90,0	35,0
3	8-15	Material o estrato rocoso color gris claro	35-57	20,0	305,2	41,8
	>15	Rebote	>57			

IV.6 Modelo de elevación digital (MED)

Inicialmente, con la colaboración de la Oficina de Geomática (OGEO) del LanammeUCR, se realizó un levantamiento con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona de estudio el día 17 de marzo de 2023.

Debido a la presencia de la vegetación que recubre la superficie del terreno, se optó por la utilización de un levamiento con tecnología LIDAR. Según Ruiz et al. (2014), la palabra LIDAR proviene del acrónimo en inglés *Laser Imaging Detection and Ranging*, cuya traducción al español sería “detección de imágenes por láser y distancia”. El fundamento de la tecnología LIDAR está en medir distancias iluminando un objetivo con un rayo láser y posteriormente analizando la luz reflejada e información generada en ese objetivo. Cada dato o punto generado con LIDAR por sí solo no tiene mucha utilidad; sin embargo, al unir los millones de puntos generados a partir de un barrido con un escáner láser en un área específica, se pueden recrear superficies en tres dimensiones. Para ello, todos los pulsos de retorno del láser son registrados y almacenados en la memoria del escáner y se calcula la distancia entre el instrumento y el objeto donde se reflejó el rayo láser.

Usando principios de física y óptica, el escáner puede obtener la posición de cada punto a partir del haz refractado, la cual es almacenada como una coordenada x-y-z. Con esto es posible registrar reptación, cárcavas, grietas, vegetación, elementos de fachadas de edificios, carros, personas, entre otros, con un error máximo de ubicación de puntos de 3 mm, el cual puede reducirse a menos de 1 mm si se aplican procedimientos de topografía de precisión y rutinas que se encuentran incluidas el software de la unidad.

La tecnología LIDAR es ideal cuando se trata de obtener elevaciones con un modelo realista de la tierra desnuda, es decir sin la vegetación que existe. Esto debido a que los pulsos de luz de LIDAR permiten atravesar la vegetación, cuando los pulsos de luz penetran los espacios entre hojas y ramas, alcanzando el suelo que se encuentra por debajo, permitiendo realizar levantamientos de terreno natural en zonas donde la fotogrametría no puede. Este tipo de tecnologías es ideal para grandes extensiones que requieren precisión, pues permiten una discriminación más precisa de la información al tener una variable adicional de intensidad, que complementa las variables de color y coordenadas de la fotogrametría normal, lo que permite una medición más precisa de la elevación del terreno y por ende un valor más exacto del terreno natural.

Con el modelo tridimensional creado, es posible obtener distancias, alturas, pendientes y volúmenes con un alto grado de precisión. Con estos modelos se pueden crear superficies, figuras sólidas y modelos de elevación que pueden ser utilizados en programas de diseño asistido por ordenador

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 24 de 38
---------------------------	--------------	-----------------

(conocidos como CAD) o en Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permiten analizar la forma y características de una superficie del terreno e identificar posibles zonas inestables que serían imposibles apreciarlas desde el terreno.

Es importante mencionar 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. Así, por ejemplo, modelos obtenidos a partir de una altura de vuelo de 50 metros presenta una resolución de pocos centímetros.

Teniendo esto en consideración y con base en el levantamiento realizado por el VANT de la OGEO, fue posible obtener el modelo de elevación de cada uno de los taludes definidos en la Figura 2 mostrada anteriormente. Como se observa en la Figura 12, el levantamiento realizado permitió recrear de una manera adecuada la superficie del terreno (sin la presencia de la vegetación) para su posterior análisis. En la Figura 10 los colores celestes y verdes representan los puntos más bajos (967 m.s.n.m.) y los colores café oscuro representan los puntos más elevados (1040 m.s.n.m.), por lo tanto, se puede deducir que la topografía presenta pendientes con inclinaciones hacia la margen del río Virilla.

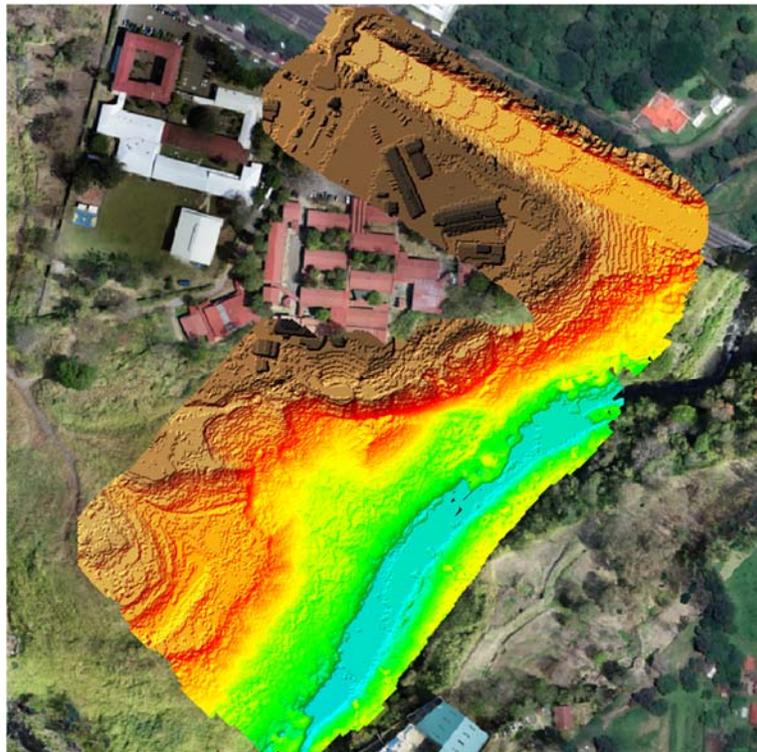


Figura 12. Modelos de elevación digital (MED) de la zona de estudio

La pendiente del terreno constituye uno de los factores más importantes en los movimientos o deslizamientos del terreno. En áreas con pendientes abruptas la erosión hídrica y los procesos gravitacionales se manifiestan con mayor intensidad. De esta manera, para caracterizar el terreno y los posibles procesos esperados en el área de estudio, se utilizó la caracterización de clases de pendiente sugeridas por van Zuidam (1986) y la leyenda de colores sugerida por el mismo autor (ver Tabla 13).

Tabla 13. Clases de pendientes, condiciones del terreno y colores sugeridos

Clase de pendiente (°)	Condiciones del terreno	Color
0-2	Planicie, sin denudación apreciable	Verde oscuro
2-4	Pendiente muy baja, peligro de erosión	Verde claro
4-8	Pendiente baja, peligro severo de erosión	Amarillo
8-16	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro de erosión severo.	Naranja
16-35	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	Rojo claro
35-55	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	Rojo oscuro
>55	Extremamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada.	Morado

Las clases de pendiente pueden coincidir con los sectores críticos, donde los procesos de deslizamiento son dominantes. Con base en esta clasificación, es posible obtener la Figura 13, en la cual se puede concluir que la topografía presenta de forma predominante pendientes de fuertes a muy fuertes, caracterizados con procesos denudacionales intensos (deslizamientos) y con condiciones extremas de erosión de suelos. Lo cual coincide con las condiciones observadas en campo durante las visitas realizadas. El mapa de pendientes también permitió definir las secciones de análisis que fueron estudiadas para la comprobación de estabilidad utilizando los métodos de equilibrio límite que se presentan más adelante.

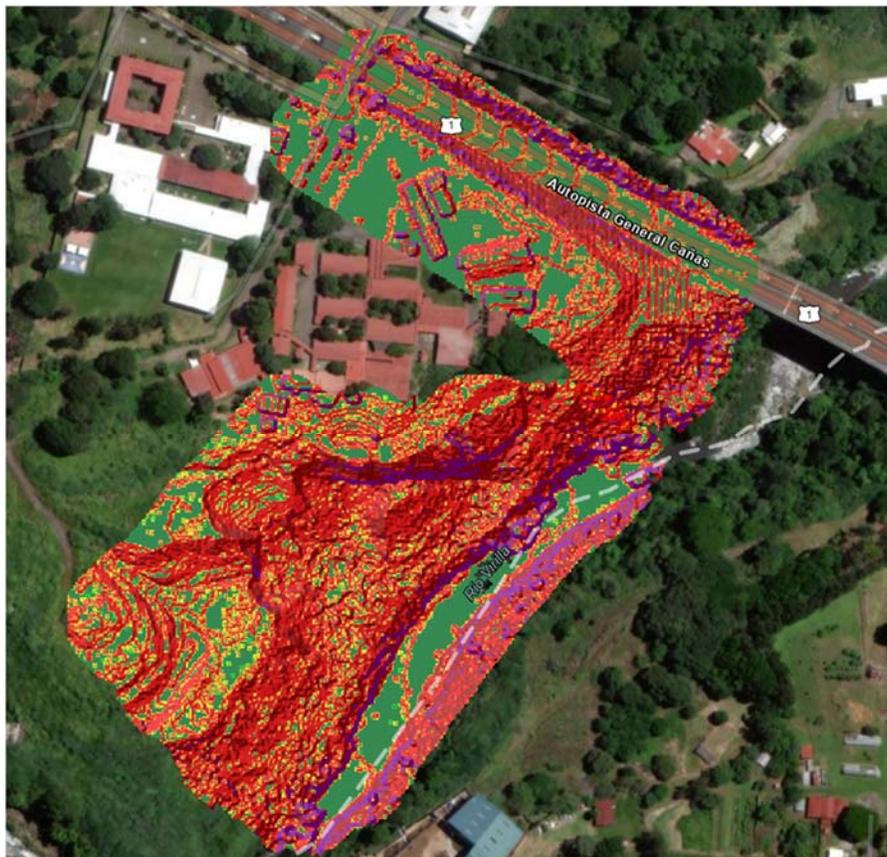


Figura 13. Mapa de pendientes y clasificación según Van Zuidam (1986) de la zona de estudio

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 26 de 38
---------------------------	--------------	-----------------



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

De acuerdo con las recomendaciones establecidas en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (CGTLCR), se considera que, para el sitio de estudio, el riesgo de pérdidas humanas se encuentra en un nivel alto y el riesgo de daños económicos y ambientales presenta un nivel medio alto, para lo cual es aceptable un valor de factor de seguridad de 1,50 en condición estática. Por su parte, si se considera la condición de sismo (pseudo-estática) se utilizó un coeficiente de aceleración horizontal del suelo de 0,15 g definido en el CGTLCR, ya que el sitio se encuentra ubicado en una Zona III con tipo de suelo S3-S4, por lo que se debe considerar un valor de factor de seguridad mayor a 1,1 en condición pseudo-estática.

Es importante mencionar nuevamente que, para efectos de los resultados del análisis de estabilidad de taludes que se muestra a continuación, al tratarse de un análisis preliminar, se considera un modelo geotécnico que asume la presencia de cuatro tipos de material. No obstante, las propiedades de los materiales de las capas más profundas corresponden a valores que han sido estimados con base en criterio experto de los autores de este informe, esto debido a que la extensión y alcance de los resultados de los ensayos de campo y de laboratorio realizados fueron en puntos específicos y, por lo tanto, los resultados fueron extrapolados a la generalidad del sitio para los análisis realizados.

Por lo tanto, se sugiere que, para la obtención de resultados definitivos, ampliar la información disponible y llevar a cabo un estudio de la estratigrafía del suelo, acompañada de una mayor cantidad de ensayos de laboratorio a cargo del profesional en geotecnia especializado que se designe para tal efecto.

Debido a que se trata de un análisis de estabilidad preliminar, entre la gran cantidad de softwares disponibles, los resultados que se presentan corresponden al uso de un programa HYRCAN de GeoWizard (www.geowizard.org), el cual es un software gratuito, que puede usarse bajo los términos de la Licencia Pública General Reducida de GNU (LGPL) versión 2.1 o versión 3 según lo publicado por la Free Software Foundation.

Este software fue seleccionado debido a que puede ser descargado y utilizado de forma gratuita, obteniéndose resultados confiables cuando son interpretados de una manera adecuada. No obstante, debido a esta condición de software libre, el mismo presenta algunas limitaciones con respecto a otros softwares comerciales, principalmente asociadas con la superficie de ruptura que considera el programa HYRCAN, la cual es una superficie de falla circular, mientras que otros programas comerciales (por ejemplo: SLIDE2, GEO5, Geostudio, OPTUM G2, GEOSTRU, entre otros) son capaces de considerar superficies de falla no circulares, compuestas o por bloques. Adicionalmente, se han encontrado diferencias en la cantidad de dovelas (o rebanas) y la distribución o tamaño de las mismas, entre los diferentes softwares disponibles. Debido a la combinación de estas características se puede generar resultados diferentes a los obtenidos por el HYRCAN, los cuales en algunos casos pueden ser muy similares, menores o superiores, dependiendo de las condiciones y la configuración del problema las cuales deben ser analizadas por el profesional en geotecnia especializado designado para tal efecto, con experiencia y criterio adecuado en este tema.

En el caso de las simulaciones realizadas en este informe, únicamente se consideran las condiciones pseudo-estáticas con el coeficiente de aceleración horizontal del suelo de 0,15 g, y una condición extrema de la presencia de un nivel freático, donde se consideran los suelos totalmente saturados. Por otro lado, no fueron considerados en los análisis ningún tipo de obra de contención en la zona de estudio. Estas condiciones de evaluación, a criterio de los autores, son representativas de las condiciones observadas en sitio, donde en general no fueron observados sistema de recolección,

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 27 de 38
---------------------------	--------------	-----------------

canalización y manejo de las aguas pluviales y de escorrentía superficial. No obstante, cualquier otra condición que se pueda considerar crítica, así como también, el análisis de superficies de ruptura no circulares deberá ser analizada por el ingeniero responsable. Sin embargo, los resultados obtenidos constituyen un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones en las estructuras vecinas al sitio donde se presentaron los problemas de estabilidad.

V.1 Comprobación de estabilidad del talud 1 ubicado en el sector norte de las instalaciones del colegio Conservatorio Castella en la margen de la RN1

Con fundamento en los apartados anteriores, en los cuales se describe el proceso de análisis, que en síntesis inician con la inspección visual del sitio, lo que permite establecer la geometría, tipo de suelo, presencia de vegetación, exposición a lluvia y agentes atmosféricos que puedan afectar la estabilidad del sitio. Una vez caracterizada la zona se continúa con la definición del área de interés a ser levantada por el VANT para así tener como insumo el MED del terreno, con el cual se crea el mapa de pendientes del sitio en específico, que a su vez permite identificar las diferentes pendientes del terreno.

Continuando con el proceso, para el análisis de estabilidad del talud se define como crítico las zonas de mayor pendiente, ya que pueden ser más susceptibles a deslizamientos, como se muestra en la Figura 14. En la zona de mayor pendiente se definen 3 secciones transversales a analizar con la metodología de equilibrio límite (ver Figura 14).

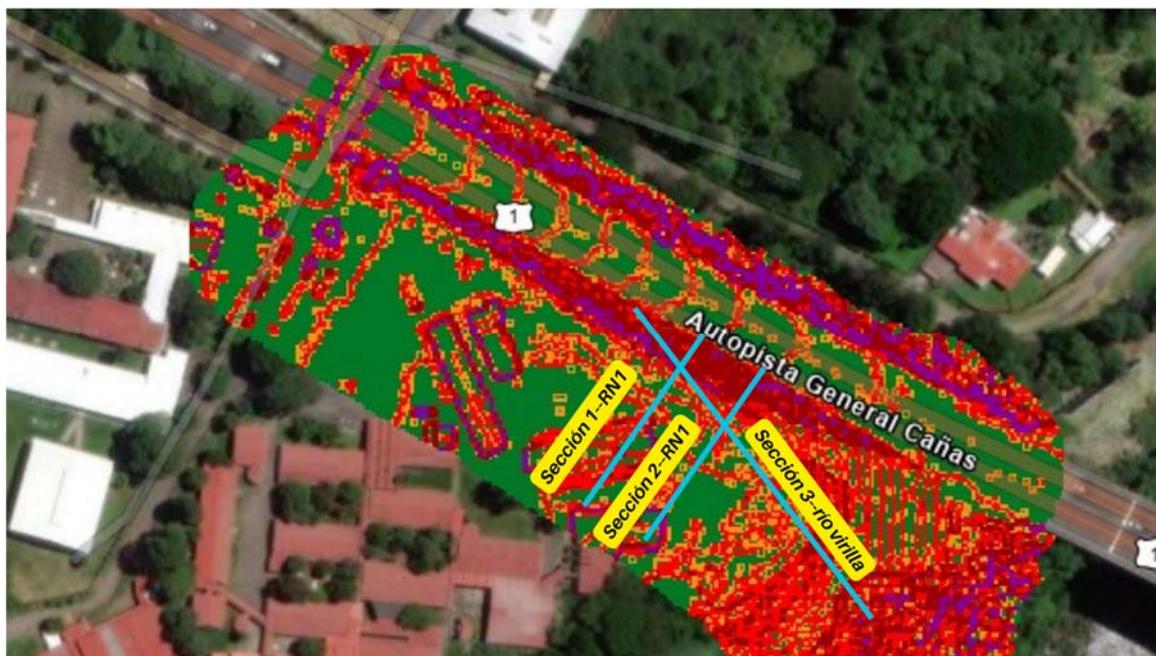


Figura 14. Mapa de pendientes del talud 1, enfatizando en zona de mayor pendiente y secciones a analizar

Es importante tener en consideración que la sección 3 no se extiende hasta la margen del río Virilla debido a que en esa zona la vegetación es muy densa y la información del relieve en ese punto no es precisa.



Cabe resaltar que, tal como se mencionó en secciones anteriores, el objetivo de estos análisis es determinar los factores de seguridad en las secciones donde la pendiente es tal que la estabilidad del sitio se puede ver afectada. Además, estos resultados se deben comparar con los valores recomendados en la normativa vigente en Costa Rica (CGTLCR).

A continuación, en la Figura 15, Figura 16 y Figura 17 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las secciones analizadas en la condición crítica, es decir considerando el suelo completamente saturado tomando en consideración la condición estática y pseudo-estática. Para esta última se considera un factor de aceleración efectiva horizontal de 0,15 g determinado en apartados anteriores. En la Tabla 14 se muestra un resumen de los resultados obtenidos y comparados con los recomendados en el CGTLCR.

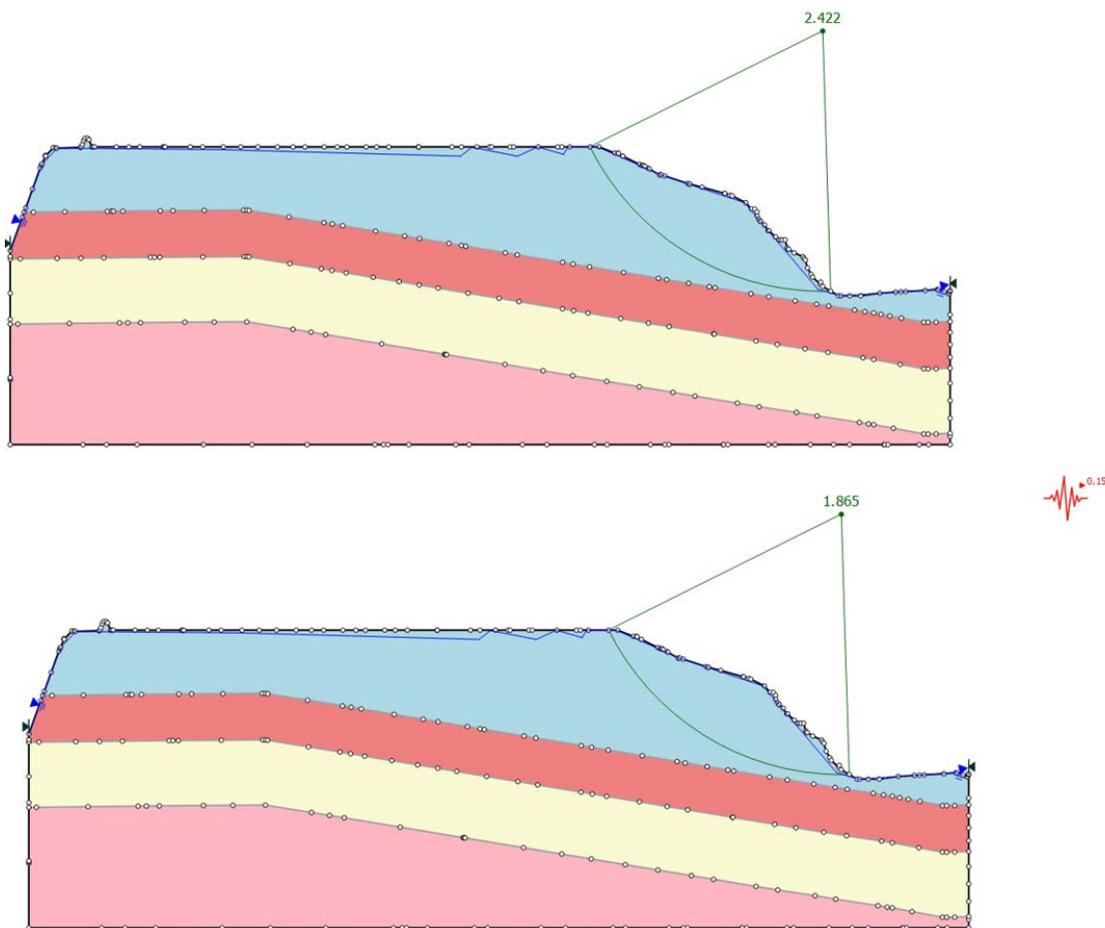


Figura 15. Análisis de estabilidad utilizando metodología de Bishop para la sección 1-RN1, condición estática y pseudo-estática respectivamente

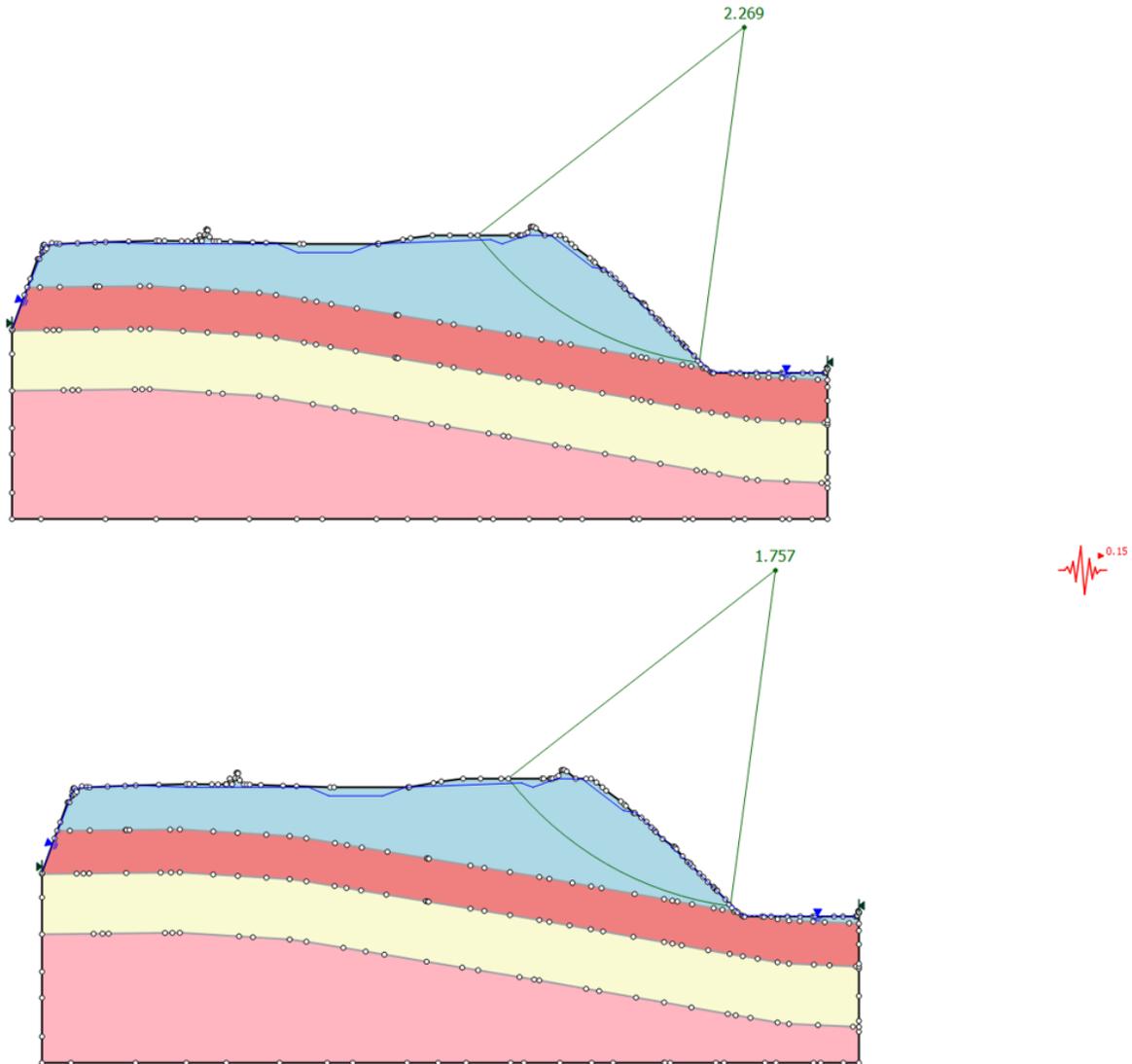


Figura 16. Análisis de estabilidad utilizando metodología de Bishop para la Sección 2-RN1, condición estática y pseudo-estática respectivamente

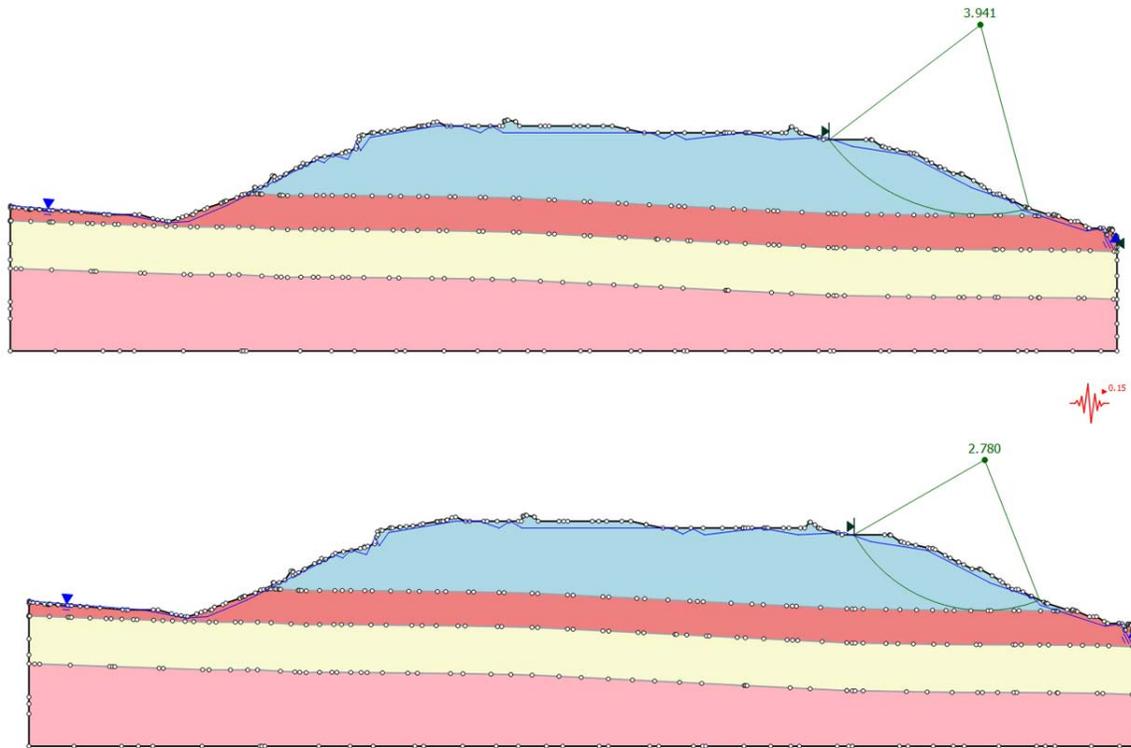


Figura 17. Análisis de estabilidad utilizando metodología de Bishop para la Sección 3- río Virilla, condición estática y pseudo-estática respectivamente

A continuación, se muestra el resumen de los resultados obtenidos en los análisis presentados en las figuras anteriores.

Tabla 14. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en secciones del Talud 1

	Sección	Método de análisis			CGTLCR
		Bishop simplificado	GLE/Morgenstern-Price	Janbu simplificado	
Estático	1-RN1	2,42	2,55	2,17	1,5
	2-RN1	2,27	2,13	2,04	
	Río Virilla	3,94	3,95	3,70	
Pseudo-estático	1-RN1	1,87	1,95	1,63	1,1
	2-RN1	1,76	1,71	1,59	
	Río Virilla	2,78	2,78	2,55	

Como se observa en la Tabla 14 los resultados los factores de seguridad obtenidos para el talud 1 cumplen con lo indicado en el CGTLCR, por lo que el talud ubicado al norte de las instalaciones del colegio Conservatorio Castella se puede considerar estable bajo la composición y condiciones supuestas de análisis indicadas en este informe. Sin embargo, se considera adecuado y necesario recomendar mantener en observación el sitio, brindar el mantenimiento pertinente y, además, considerar implementar un adecuado sistema de manejo de aguas de escorrentía superficial, ya que al saturarse el suelo es posible que se presente una condición crítica para la estabilidad del talud.

V.2 Comprobación de estabilidad del talud 2 ubicado en el sector sur de las instalaciones del colegio Conservatorio Castella en la margen del río Virilla

En el caso del talud localizado en el sector sur de las instalaciones del colegio Conservatorio Castella y que ha sido identificado como talud 2, se procede de la misma manera que con el talud 1, donde con base en la visita de campo, el levantamiento con el VANT, el MED de terreno, el mapa de pendientes y la localización de edificaciones próximas a la corona del talud se definieron cinco secciones transversales de análisis de estabilidad de taludes en dos dimensiones (2D), las cuales se detallan en la Figura 18 y que se han denominado tal cual se muestra en la misma figura, que como se observa, se definieron 5 secciones de análisis:

- Anfiteatro: corresponde a una sección que atraviesa el anfiteatro del colegio, el cual fue inhabilitado después del deslizamiento de 2017
- Pabellón F: sección próxima al anfiteatro y que se encuentra inhabilitado desde el deslizamiento del 2017
- Pabellón H: sección próxima al sector con las mayores pendientes en la zona de estudio
- Mantenimiento: sección próxima al anfiteatro y cercana a la corona del deslizamiento de 2017
- Longitudinal Deslizamiento: sección longitudinal al deslizamiento registrado en el 2017

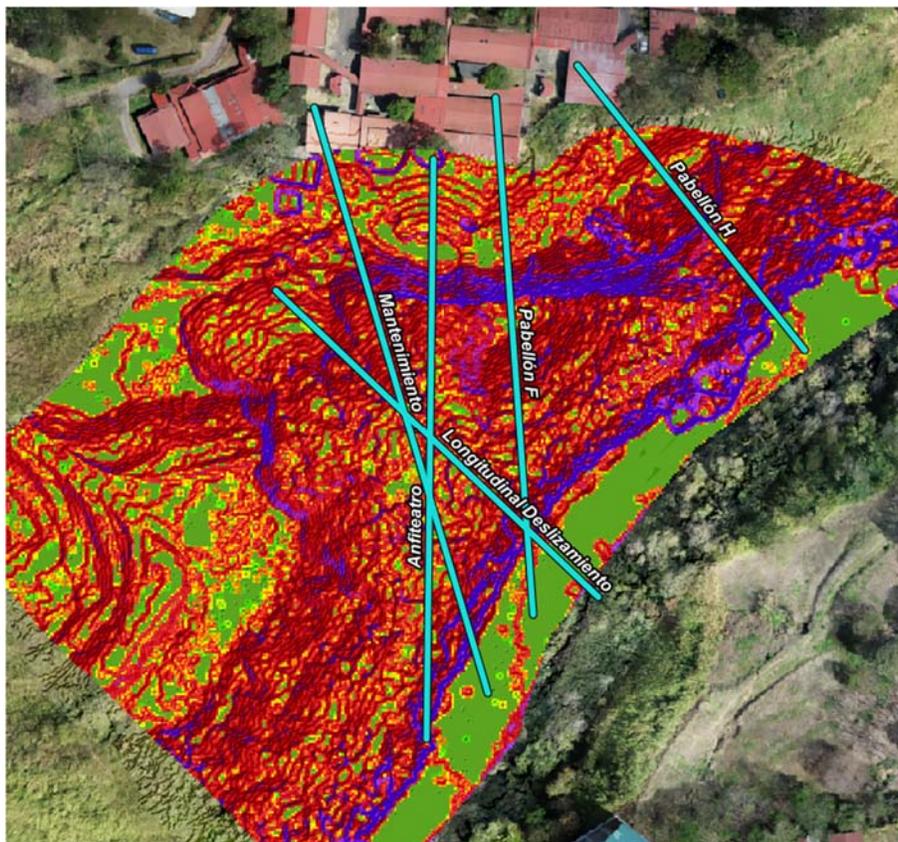


Figura 18. Mapa de pendientes del talud 2, enfatizando en zona de mayor pendiente y secciones a analizar



Nuevamente el objetivo de estos análisis es determinar los factores de seguridad en estas secciones para poder comparar los valores obtenidos con las recomendaciones establecidas en el CGTLCR. En todos los casos se consideró una condición crítica, en la cual el nivel freático se encontraba prácticamente en la superficie (suelo completamente saturado) y considerando la condición pseudo-estática. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 19, Figura 20 y Figura 21, y se resumen en la Tabla 15 para los diferentes métodos de análisis empleados.

Los gráficos de los resultados de los análisis estáticos no se presentan para las secciones analizadas, ya que como se puede observar en la Tabla 15 los valores obtenidos fueron superiores a la condición pseudo-estática, donde esta última representa una condición más crítica y cuyos resultados son bastante favorables.

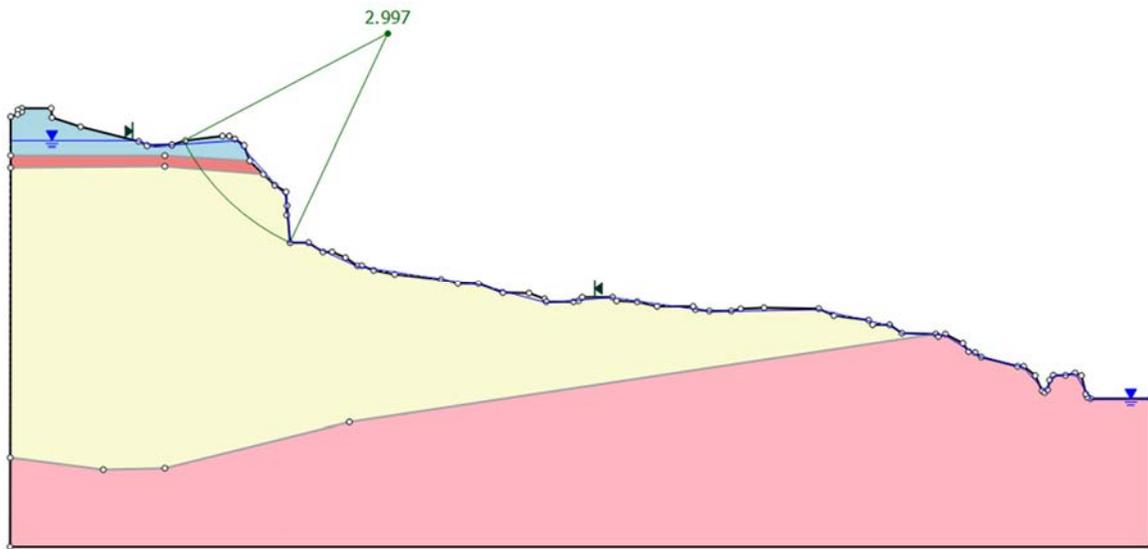


Figura 19. Sección Anfiteatro: modelo geotécnico considerado y factor de seguridad obtenido con el método de Bishop Simplificado para condiciones pseudo-estáticas

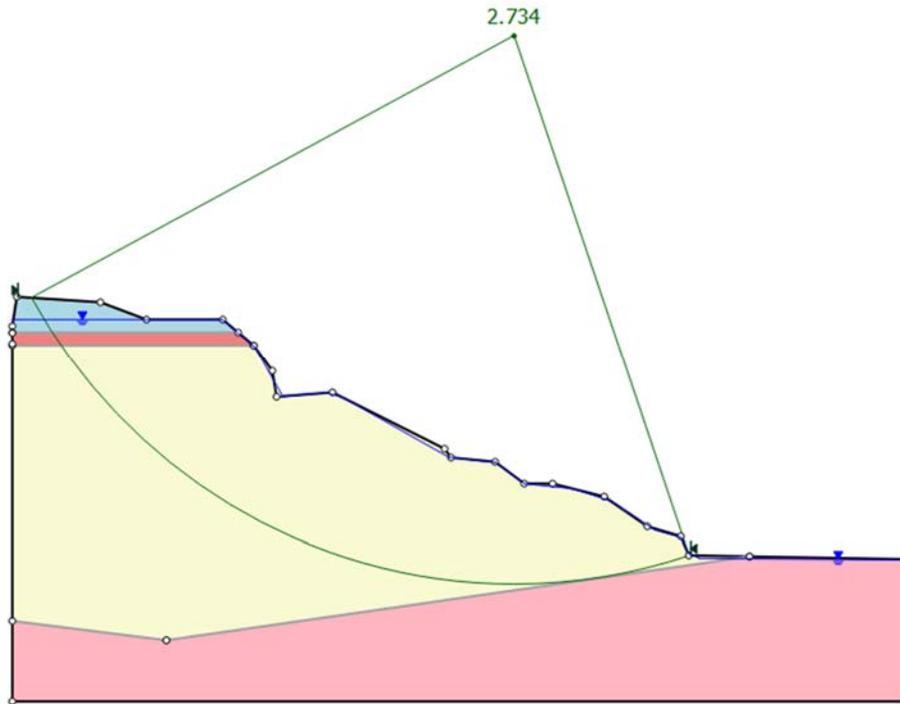


Figura 20. Sección Pabellón F: modelo geotécnico considerado y factor de seguridad obtenido con el método de Bishop Simplificado para condiciones pseudo-estáticas

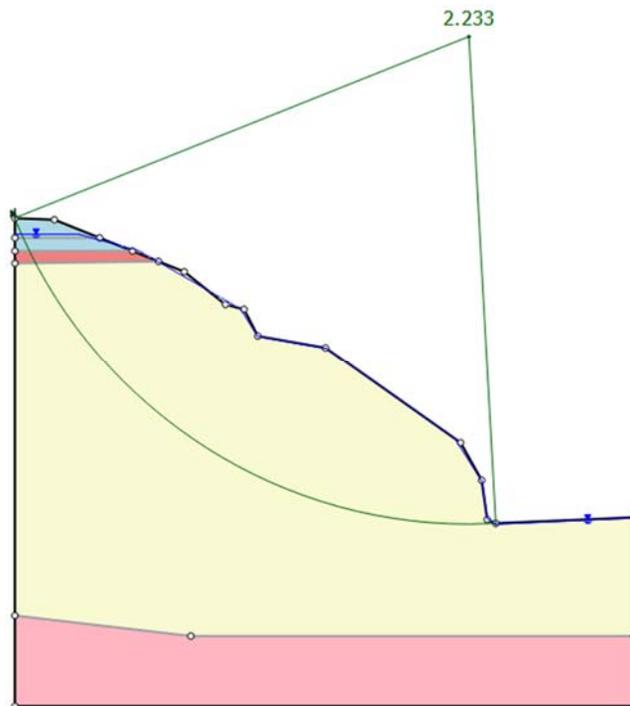


Figura 21. Sección Pabellón H: modelo geotécnico considerado y factor de seguridad obtenido con el método de Bishop Simplificado para condiciones pseudo-estáticas

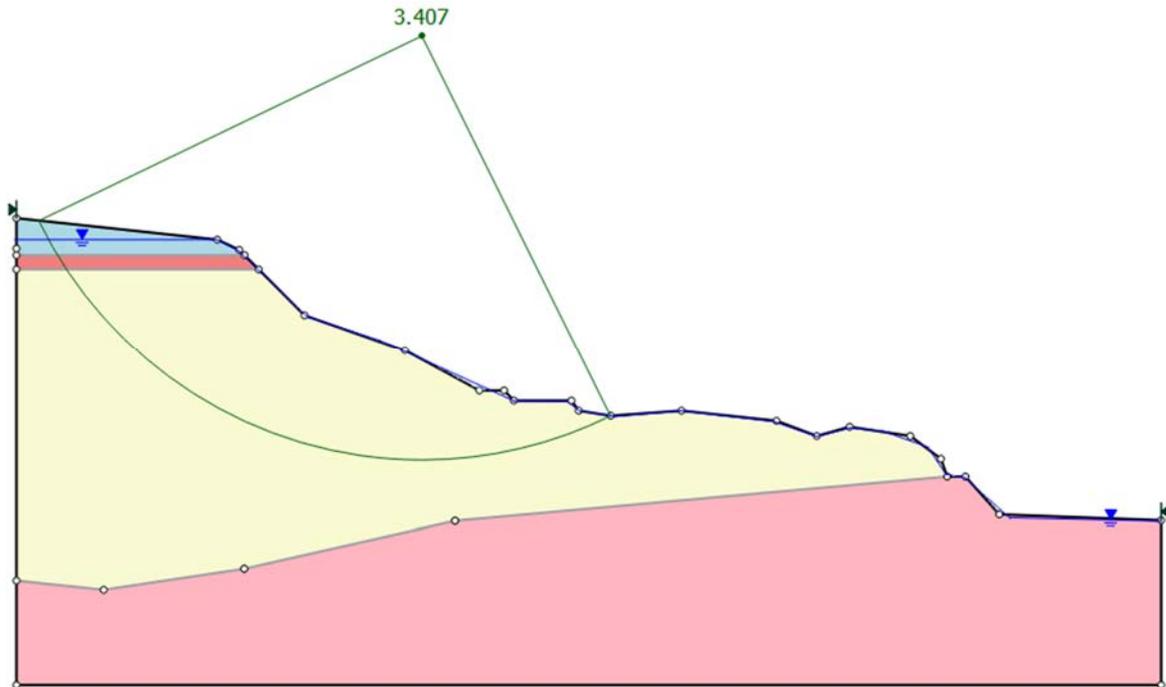


Figura 22. Sección Mantenimiento: modelo geotécnico considerado y factor de seguridad obtenido con el método de Bishop Simplificado para condiciones pseudo-estáticas

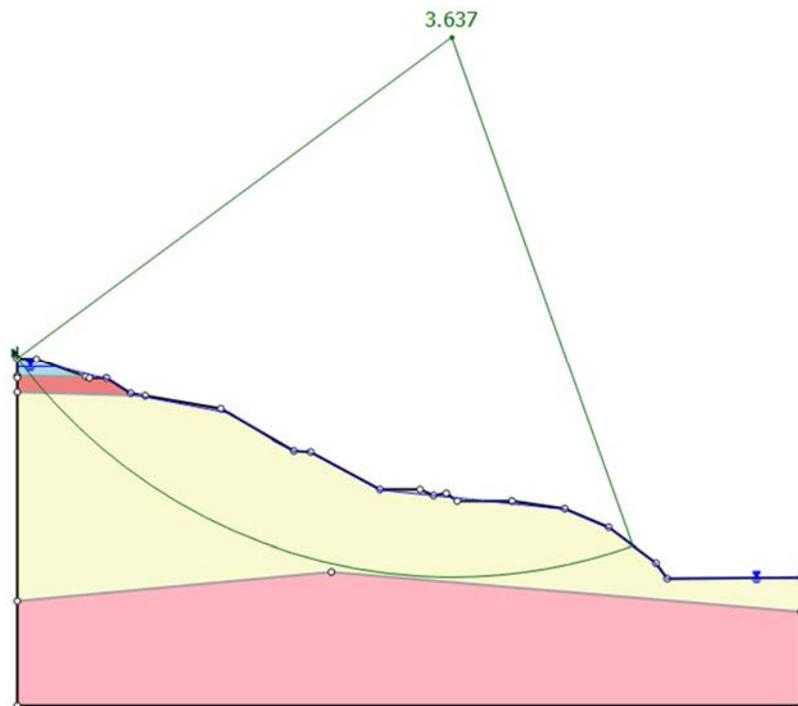


Figura 23. Sección Longitudinal Deslizamiento: modelo geotécnico considerado y factor de seguridad obtenido con el método de Bishop Simplificado para condiciones pseudo-estáticas



Tabla 15. Factores de seguridad obtenidos para diferentes métodos de análisis de equilibrio límite en secciones del talud 2

Sección	Método de análisis			CGTLCR
	Bishop simplificado	GLE/Morgenstern-Price	Janbu simplificado	
Estático	Anfiteatro	3,586	3,583	3,584
	Pabellón F	3,876	3,869	3,509
	Pabellón H	2,978	2,969	2,763
	Mantenimiento	4,784	4,777	4,202
	Longitudinal Deslizamiento	5,587	5,581	5,165
Pseudo-estático	Anfiteatro	2,997	3,154	2,901
	Pabellón F	2,734	2,738	2,437
	Pabellón H	2,233	2,230	2,002
	Mantenimiento	3,407	3,411	2,913
	Longitudinal Deslizamiento	3,637	3,639	3,353

Estos resultados fueron comparados con las recomendaciones del CGTLCR, de forma tal que los factores de seguridad son mucho mayores al $FS > 1,1$ en la condición pseudo-estática y superiores al valor de $FS > 1,5$ para la condición estática, recomendados por el CGTLCR, lo cual sugiere desde el punto de vista del MEL desempeños adecuados de los taludes.

De los resultados obtenidos, se puede considerar que el talud ubicado al costado sur de las instalaciones del colegio Conservatorio Castella resulta estable bajo las suposiciones de análisis indicadas en este informe. Sin embargo, se considera adecuado y necesario recomendar mantener en observación el sitio, brindar el mantenimiento pertinente y, además, considerar implementar un adecuado sistema de manejo de aguas de escorrentía superficial, ya que al saturarse el suelo es posible que se presente una condición crítica para la estabilidad del talud.

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 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, se constituya como un insumo y una guía que pueden ser tomados en consideración para llevar a cabo estos análisis y con ello evaluar las afectaciones que de ser el caso pueda sufrir la infraestructura del colegio Conservatorio Castella.

En general, el análisis de estabilidad de un talud utilizando un mapa de pendientes y el equilibrio límite es una herramienta útil para evaluar la estabilidad de taludes y prevenir posibles deslizamientos. Al utilizar un mapa de pendientes, se pueden identificar zonas con pendientes pronunciadas que podrían ser más propensas a la inestabilidad. Además, el equilibrio límite permite calcular los factores de seguridad y evaluar la estabilidad del talud. Sin embargo, eso no exime la necesidad de realizar análisis detallados de algún talud de menor pendiente y que presente indicios y condiciones de inestabilidad. Por ello, y a pesar de que el mapa de pendientes se considera como una herramienta útil, no se recomienda descartar visitas técnicas para realizar la inspección visual del sitio por parte del profesional designado para realizar los análisis correspondientes.



A partir de los resultados obtenidos de los modelos construidos con la información del levantamiento realizado se destaca que, para las propiedades del material utilizado y el modelo geotécnico definido, los factores de seguridad en ambos casos de análisis al compararlos con las recomendaciones del CGTLCR, se obtuvieron resultados tales que los factores de seguridad son mayores al $FS > 1,1$ en la condición pseudo-estática y superiores al valor de $FS > 1,5$ para la condición estática, recomendados por el CGTLCR, lo cual sugiere desde el punto de vista del MEL comportamientos adecuados de los taludes.

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

Igualmente, es importante destacar que los análisis realizados para este informe utilizaron únicamente el Método de Equilibrio Límite (MEL), no obstante, debe tenerse en consideración que este enfoque ignora el comportamiento de esfuerzo-deformación, el cual se considera importante ejecutar para conocer o estimar las deformaciones en los sectores próximos a las edificaciones, como por ejemplo en el sector del anfiteatro del colegio. A pesar de esto, los resultados obtenidos se constituyen como un insumo y una guía que pueden ser tomados en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones que pueden sufrir los taludes y las instalaciones del colegio.

Adicionalmente, se resalta de nuevo que, durante las visitas realizadas, se observaron que los taludes existentes carecen de sistemas adecuados para el control de la escorrentía superficial. Dada esta condición y por los análisis realizados, se recomienda implementar medidas integrales de mitigación para detener y evitar la erosión de la cara de los taludes, en especial los taludes de la zona norte cercanos a la RN1, así como colocar sistemas para el control de la escorrentía superficial y evitar que se presenten problemas de estabilidad.

VII. Referencias

1. Alvarado, G.E. & Gans, P.B., 2012: Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. – Revista Geológica de América Central, 46: 7-122
2. Asociación de geotecnia (2009). Código de Cimentaciones de Costa Rica. Tecnológico de Costa Rica
3. Unidad de investigación y análisis de riesgo (2019). Inspección de seguimiento en margen derecha del río Virilla, Heredia. Por inestabilidad del terreno y deslizamiento. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). San José, Costa Rica.
4. Campo et al., (2018) Informe de gira al conservatorio Castella. Escuela de Ingeniería Topográfica, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica
5. Denyer, P. & Arias, O., 1991: Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 12:1-59.



6. Hannah, R.S., Vogel, T.A., Patino, L.C., Alvarado, G.E., Pérez, W. & Smith, D.R., 2002: Origin of silicic volcanic rocks in Central Costa Rica: a study of a chemically variable ash-flow sheet in the Tiribí Tuff. *Bulletin of Volcanology*, 64:117-133.
7. Kutterolf, S., Freundt, A. & Pérez, W, 2008: Pacific offshore record of plinian arc volcanism in Central America: 2. Tephra volumes and erupted masses. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(2): Q02S02, doi:10.1029/2007GC001791.
8. Laboratorio de Geotécnica (2023). EIC-Lanamme-INF-0410-2023 Informe de ensayo muestras Conservatorio Castella. LanammeUCR. San José, Costa Rica.
9. Laboratorio de Geotécnica (2023). EIC-Lanamme-INF-0502-2023 Informe de ensayo muestras Conservatorio Castella. LanammeUCR. San José, Costa Rica
10. Pérez, W., 2000: Vulcanología y petroquímica del evento ignimbrítico del Pleistoceno Medio (0,33 M.a.) del Valle Central de Costa Rica. - Tesis de Licenciatura, ECG-UCR, 170 pp.+ apéndices.
11. Pérez, W., Alvarado, G.E. & Gans, P., 2006: The Tiribí Tuff: stratigraphy, geochronology and mechanisms of deposition of the largest and most recent ignimbrite in Central Valley, Costa Rica. *Bull. Volcanol.* 69: 25-40, doi: 10.1007/s00445-006-0053-x
12. Ruiz, P. & Soto, J.G., 2014: Preparación del mapa de susceptibilidad a deslizamientos utilizando imágenes lidar en los Cerros de Escazú, cantones de Aserrí, Desamparados, Alajuelita, Santa Ana y Escazú, Costa Rica. San José Costa Rica, CNE. DOI: 10.13140/RG.2.2.33311.76967
13. Sánchez, B (2017). Informe técnico: Valoración de riesgo en margen derecha del río Virilla, Heredia, por inestabilidad del terreno y deslizamiento. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). San José, Costa Rica.

EIC-Lanamme-INF-0560-2023	mayo de 2023	Página 38 de 38
---------------------------	--------------	-----------------