



## Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: EIC-Lanamme-INF-1711-2022

### Informe de evaluación del deslizamiento en el kilómetro 17+065 y su influencia en la ruta nacional N°27 y el puente sobre el río Virilla



Preparado por:

Ing. Laura Solano Matamoras  
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica  
Diciembre, 2022





<b>1. Informe</b> EIC-Lanamme-INF-1711-2022		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> Informe de evaluación del deslizamiento en el kilómetro 17+065 y su influencia en la ruta nacional N°27 y el puente sobre el río Virilla		<b>4. Fecha del Informe</b> 07/12/2022
<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 próximos al puente sobre el río Virilla, mismos resultantes del deslizamiento ocurrido el 18 de septiembre de 2022 en el Km 17+065 de la ruta nacional 27. Estos análisis tienen la finalidad de verificar de manera preliminar la posible afectación al puente y a la Ruta Nacional dada la condición actual del sitio.</i> <i>Cabe resaltar que el deslizamiento ocurrió durante el paso de la tormenta tropical Fiona por los límites del territorio nacional. De acuerdo con los datos de Instituto Meteorológico Nacional, esta tormenta influyó directamente el clima y precipitación del país, desde el domingo 18 de setiembre. A partir de los resultados preliminares obtenidos en las simulaciones de la condición actual se destaca que, para las propiedades de los materiales utilizados 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, específicamente para las zonas cercanas a la corona del talud. Al realizar la inspección visual del sitio durante el recorrido de la gira de campo, fue posible identificar esta condición ya que, debido al deslizamiento el terreno sufrió una relajación de esfuerzos ocasionando agrietamientos que dan como resultado bloques inestables. Sin embargo, las zonas de estudio posterior al deslizamiento adoptaron un pendiente a favor de la estabilidad, por lo que muestran resultados preliminares de factores de seguridad favorables y que cumplen con los requisitos del Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica. Los análisis se realizaron con el Método de Equilibrio Límite (MEL), por lo que se debe tener en consideración que este enfoque ignora el comportamiento de esfuerzo-deformación, el cual se considera importante realizar para conocer las posibles deformaciones que pueden haberse presentado en el bastión del puente y pavimento sobre ruta nacional 27.</i> <i>Por último, se recalca la importancia de realizar estos análisis por parte de la Administración contando con una campaña de exploración geotécnica más extensiva para contar con propiedades más representativas de los sitios en estudio.</i>		
<b>8. Palabras clave</b> GSI, limo, matriz de roca, deslizamiento, agrietamiento, monitoreo	<b>9. Nivel de seguridad:</b> -	<b>10. Núm. de páginas</b> 37
<b>11. Preparado por:</b>  Ing. Laura Solano Matamoros Ingeniera Programa de Ingeniería Geotécnica  Dr. Paulo Ruiz Cubillo Geólogo UGERVN-PITRA		
<b>12. Revisado y aprobado por:</b>  Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc Coordinadora Programa de Ingeniería Geotécnica		



## Contenido

I.	Introducción .....	4
II.	Descripción general del sitio.....	4
II.1	Geomorfología.....	5
II.1.1	Forma de origen fluvial - Cañón del Río Virilla.....	5
II.1.2	Formas de origen volcánico - pendiente baja < 10° Ignimbritas .....	5
II.2	Geología Regional.....	6
II.3	Geología local.....	7
II.3.1	Formación Pacacua.....	8
II.3.2	Formación Peña Negra .....	8
II.3.3	Formación Colima (Miembro Colima Superior) .....	8
II.3.4	Formación Tiribí.....	10
II.4	Tectónica local.....	10
II.4.1	Falla Paleo Virilla.....	10
II.5	Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Santa Ana .....	11
II.6	Condición actual .....	12
III.	Descripción del trabajo realizado .....	13
III.1	Modelo de elevación digital (MED).....	13
III.2	Caracterización y clasificación del macizo rocoso .....	15
III.3	Comprobación de estabilidad de los taludes utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL)21	
III.3.1	Resultado de estabilidad de la sección 1 utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) 22	
III.3.2	Resultado de estabilidad de la sección 2 utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) 28	
III.3.3	Resultado de estabilidad de la sección 3 utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL) 32	
IV.	Comentarios finales.....	35
V.	Referencias .....	36



# Informe de evaluación del deslizamiento en el kilómetro 17+065 y su influencia en la Ruta Nacional N°27 y el puente sobre el río Virilla

## I. Introducción

Como parte de las labores que le otorga la ley 8114 al LanammeUCR, el presente informe muestra los resultados preliminares del análisis de estabilidad de la superficie de los taludes próximos al puente sobre el río Virilla, mismos resultantes luego del deslizamiento ocurrido el 18 de septiembre de 2022 en el Km 17+065 de la ruta nacional 27 (RN N°27). Estos análisis tienen la finalidad de verificar la posible afectación al puente y carretera nacional dada la condición actual del sitio.

Cabe resaltar que el deslizamiento ocurrió durante el paso de la tormenta tropical Fiona por los límites del territorio nacional. De acuerdo con los datos de Instituto Meteorológico Nacional, esta tormenta influyó directamente el clima y precipitación del país, desde el domingo 18 de setiembre.

El análisis específico realizado responde a las evidencias de inestabilidad del terreno tales como agrietamientos y topografía del sitio. Se comentan algunos aspectos geotécnicos observados en el sitio respecto a la condición del terreno y la posible afectación a la cimentación del puente sobre el río Virilla en la RN N°27.

## II. Descripción general del sitio

El sitio de análisis se ubica en el distrito de Brasil, cantón de Santa Ana, provincia San José en el sector sur del puente sobre el río Virilla en la ruta nacional 27, aproximadamente en el km 17+065, tal y como se observa la Figura 1.

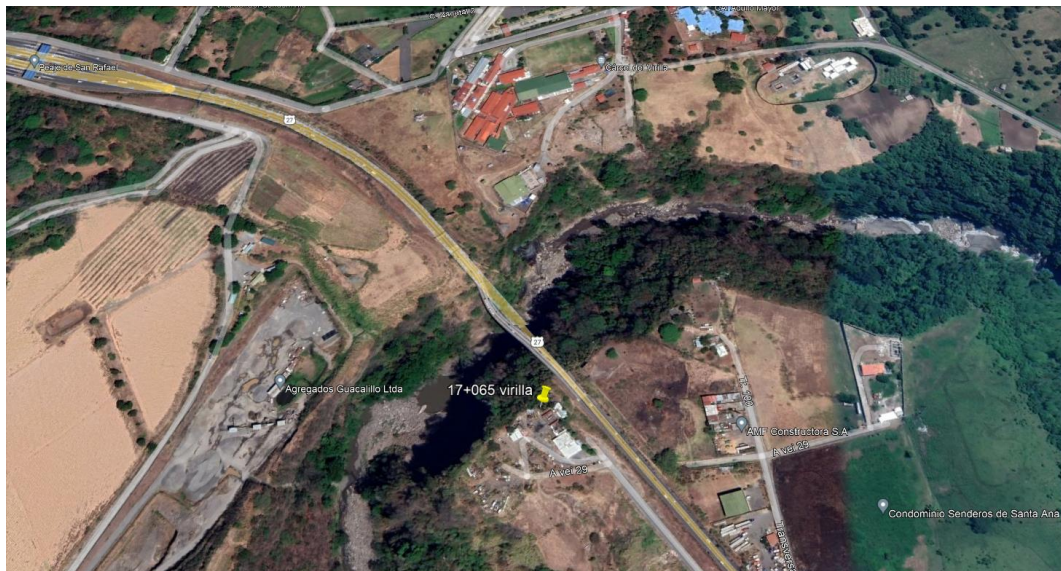


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio

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 Dr. Paulo Ruiz Cubillo de la Unidad de gestión de Evaluación de la Red Vial Nacional del Programa de Ingeniería del Transporte del LanammeUCR (UGERVN).



## II.1 Geomorfología

Entre los trabajos geomorfológicos que se han realizado anteriormente en el sector oeste de San José y que incluyen la zona donde ocurrió el deslizamiento del Río Virilla del 18 de setiembre de 2022, se pueden mencionar (Bergoeing, 1981; Hernández & Vargas, 1992; Zamora, 2005, Soto et al., 2012 y Ruiz & Soto 2014). Utilizando una categorización de unidades geomorfológicas con base en su origen de formación y diferentes grados de pendientes de sus laderas, el área de estudio de este informe se encuentra dentro del grupo de formas de origen fluvial y específicamente con la morfología de un cañón de río y forma de origen volcánica con pendiente  $< 10^\circ$ , estas formas se describirán a continuación.

### II.1.1 Forma de origen fluvial - Cañón del Río Virilla

El cañón del Río Virilla presenta morfologías similares a las de otros cañones del Valle Central como el del río Tiribí (entre Bajo los Anonos y Guachipelín de Escazú), la sección norte del río Agres específicamente donde corta la RN-27 cerca de Multiplaza y se extiende hacia el norte hasta que se une al cañón del Río Tiribí. Las pendientes que presentan estos tres cañones son en promedio cercanas a los  $60^\circ$  y en algunos casos llegan a ser casi verticales (Figura 2). El cañón del Río Virilla se extiende por más de 30 km, en ciertos puntos llega a tener profundidades superiores a los 90 m y un ancho que varía entre 200 y 60 m. El origen de esta morfología se debe a erosión fluvial de materiales volcánicos (ignimbritas y lavas) durante al menos 300 000 años (edad de las ignimbritas, como se verá más adelante). Se destaca que, pese a la corta edad de estos cañones, hay sitios donde el patrón de drenaje tiene características meándricas, las cuales son típicas de drenajes más evolucionados.



Figura 2. Fotografía aérea donde en primer plano se observa la morfología del cañón del Río Virilla y la planicie de origen volcánica generada por el depósito de ignimbritas de la Formación Tiribí aguas arriba del puente de la Ruta Nacional N° 27. Al fondo se observan de izquierda a derecha los volcanes Poás, Barva y Zurquí

### II.1.2 Formas de origen volcánico - pendiente baja $< 10^\circ$ Ignimbritas

Esta unidad geomorfológica se encuentra ubicada en la zona superior y plana sobre la que se encuentra una gran sección de la RN-27 entre Santa Ana y San Rafael de Alajuela. Tiene una extensión de casi 30 km a lo largo de la periferia de los cañones de los ríos Virilla y Tiribí y un ancho que puede llegar a superar los 4 km (Figura 2). Posee una topografía casi plana y con muy pocos cambios de altura. También presenta una leve pendiente ( $< 10^\circ$ ) que está inclinada de este a oeste. El patrón de drenaje

que se presenta en esta unidad es paralelo para quebradas y ríos menores, y en algunos sectores de los principales ríos puede considerarse meándrico. La genética de esta unidad está relacionada con flujos piroclásticos provenientes del volcán Barva hace 323 mil años (Pérez et al., 2006). Estos flujos rellenaron la topografía pre-existente dejando el terreno relativamente plano.

## II.2 Geología Regional

Las unidades geológicas que se encuentran en el sector oeste de San José y que están relativamente cerca del sitio de interés de este informe, son desde la más vieja hasta la más reciente y siguiendo la estratigrafía geológica las siguientes formaciones: Pacacua, Peña Negra, San Miguel, Coris, La Cruz, Grifo Alto, Intrusivo de Escazú, Colima, Tiribí, Barva, Lahares (Lavina) y cenizas, así como depósitos recientes de aluviones y coluvios.

La base geológica fundamental y el conocimiento reciente del cartografiado geológico del Valle Central proviene del trabajo de Denyer y Arias (1991). A partir de ese trabajo, se ha mejorado con el tiempo el entendimiento de la estratigrafía y descripción de las formaciones geológicas del Valle Central, las principales contribuciones posteriores han venido de trabajos como: Climent & Bolaños; 1999, Hidalgo et al., 2004; Méndez & Hidalgo, 2004; Soto et al., 2012 y Ruiz y Soto, 2014 quienes presentan un nuevo mapa geológico para la Hoja Abra (Figura 3) donde se incluye la zona de estudio en detalle.

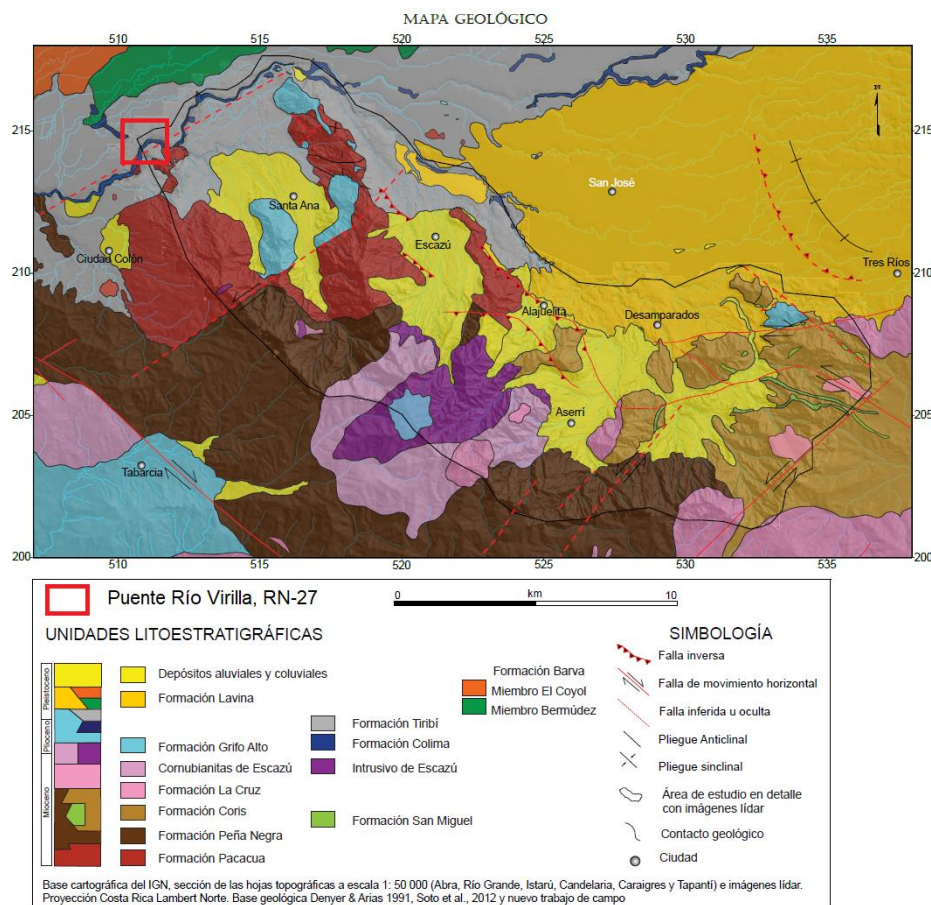


Figura 3. Mapa geológico de la zona central del Valle Central, donde se muestra el sitio de ubicación del puente sobre el Río Virilla de la RN-27 (Modificado de Ruiz y Soto 2014)

Las edades de las formaciones geológicas (principalmente de los productos volcánicos del Pleistoceno - Holoceno) han sido refinadas con los trabajos de: Hannah et al., 2002; Gans et al., 2002 y 2003; Marshall et al., 2003; MacMillan et al., 2004; Pérez et al., 2006; Alvarado & Gans, 2012 y Ruiz et al., 2019 ayudando a mejorar la cronoestratigrafía del sector central del Valle Central (Figura 2). Los trabajos de Hannah et al., 2002 y Pérez et al., son fundamentales para el entendimiento de la Formación Tiribí y su posición estratigráfica.

### II.3 Geología local

Las formaciones geológicas que afloran en las cercanías del puente del Río Virilla de la RN-27 son: Formación Pacacua y Formación Peña Negra (ambas en pequeños parches que aparecen en fondo del cauce del río Virilla en las zonas donde la erosión fluvial ha sido más intensa y donde se han removido las formaciones volcánicas superiores). En el resto del fondo del cauce afloran materiales de la Formación Colima. En ambos márgenes del Río Virilla y en tajos cercanos como el tajo Guacalillo afloran materiales de las formaciones Colima y Tiribí. Los materiales que componen el deslizamiento ocurrido el 18 de setiembre del presente año y que se analiza en este informe corresponden con lavas del miembro Colima Superior, de la Formación Colima y las columnas de la Formación Tiribí. En la Figura 3 se presenta el mapa geológico local de la zona de estudio de este informe.

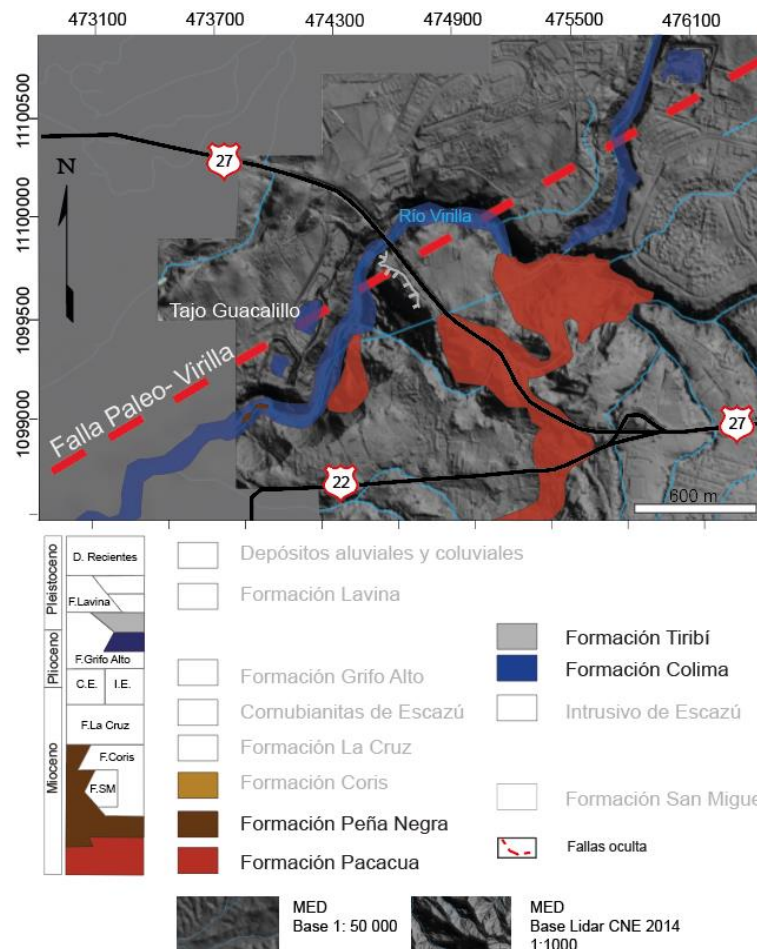


Figura 4. Mapa Geológico local de la zona de estudio basado y modificado de Ruiz y Soto 2014. En la simbología se presenta toda la estratigrafía del Valle Central, pero, en color más oscuro se presentan las formaciones que aparecen en el área de estudio en detalle





A continuación, se describen detalles geológicos de estos materiales, así como de las formaciones sedimentarias que aparecen en parches en el cauce del río aguas abajo del punto de interés y cerca del peaje de Ciudad Colón de la RN-27.

### **II.3.1 Formación Pacacua**

Aflora en pequeños parches en el cauce del Río Virilla y algunas zonas deslizadas cerca del cañón del mismo río (Figura 3), esta litología no está incluida dentro de los materiales que se deslizaron cerca del puente del Río Virilla. Son principalmente areniscas y brechas de diferentes tamaños de granos, siliciclásticas, usualmente de color moráceo, gris y verdoso, y con diferentes grados de meteorización; así como lutitas, de color rojo y café y están, por lo general, muy meteorizadas. La estratificación es desde masiva hasta estratos de espesor centimétrico, con estructuras de acanalamiento y estratificación cruzada abundantes, gradación normal e inversa, secciones con buena y mala granoselección. Subyace a la Formación Peña Negra, aunque ese contacto no se observa en el cauce del río. Si se puede observar subyaciendo y en contacto discordante con las lavas de la Formación Colima en el cauce del río Virilla. Su edad había sido establecida como Mioceno Medio- Superior por Alvarado (1982). Denyer & Arias (1991), sin embargo, con base en criterios estratigráficos consideraron que se depositó durante el Mioceno Inferior.

### **II.3.2 Formación Peña Negra**

Al igual que las rocas de la formación anterior, los materiales de la Formación Peña Negra afloran en pequeños parches en el cauce del Río Virilla aguas abajo del puente de la RN-27 (Figura 3) y no estuvieron relacionados con el deslizamiento. Las rocas que la conforman son areniscas medias a finas y lutitas, pardas y grises hasta negras, en estratos usualmente decimétricos y en algunos casos con fósiles. Las rocas de esta formación están profusamente meteorizadas a suelos color pardo-rojizo, en zonas de mejor exposición como las que se ubican cerca de Piedras Negras (Puriscal) puede tener espesores de 5 a más de 10 m, y con perfiles de roca meteorizada que pueden alcanzar hasta 25 m. Están asimismo intruidas por pequeños diques del Intrusivo de Escazú y algunas áreas con alteración hidrotermal leve y metamorfismo de contacto a cornubianitas, en la cercanía a cuerpos intrusivos hipoabisales de Escazú.

Los buzamientos muestran estructuras tectónicas como plegamiento y falla en áreas periféricas. El contacto inferior de esta formación en el área estudiada es concordante sobre la Formación Pacacua en parte, y el contacto superior no es visible, pero es discordante con las formaciones volcánicas de Colima y Tiribí. Su edad ha sido establecida como Mioceno Medio por Denyer & Arias (1991).

### **II.3.3 Formación Colima (Miembro Colima Superior)**

La Formación Colima sólo es asequible en afloramientos aislados, la mayoría de ellos en cañones de ríos poco transitables en la actualidad (Virilla, Torres, Tiribí, María Aguilar), o bien en algunos tajos que han destapado algunas partes. El resto de la estratigrafía de Colima, se ha hecho con base en testigos de pozos perforados con interés hidrogeológico (Ruiz y Soto, 2014). De modo que en general, se agrupan en la Formación Colima, una serie de unidades de roca, heterogéneas entre ellas, que comprenden todas las lavas sobre el techo del basamento sedimentario y volcánico (Formaciones Pacacua, Peña Negra, San Miguel, Coris y Aguacate) hasta el piso de la Formación Tiribí. Echandi (1981) la dividió en Miembro Belén (o Colima Inferior, andesitas porfíricas con dos piroxenos), Ignimbritas Puente de Mulas y Miembro Linda Vista (o Colima Superior, que son andesitas africanas). Aquí solo se describe el miembro superior que es el que está aflorando en el sector del deslizamiento analizado en este informe y en el tajo Guacalillo que se visitó para determinar la estratigrafía de la zona.

Las lavas de Miembro Colima Superior afloran en los ríos Tiribí y Virilla, hasta llegar aguas abajo del puente del Río Virilla de la RN-27 (Figura 4). La secuencia aflorante en los márgenes del puente de la RN-27 sobre el Virilla, es típicamente de lavas africanas. Puede mostrar brechas de techo y base que se



ven en varios tajos a lo largo del corredor del Virilla. Son claramente al menos dos coladas de lava visibles en tajos y afloramientos. En la localidad tipo, el Tajo Colima, en el sitio de Linda Vista, descrita por Echandi (1981), la colada inferior es algo porfirítica, con plagioclasas y olivino.

Las lavas de Colima Superior tienen el aspecto de gran fluidez debido al carácter de sus vesículas aplastadas, y orientación de la matriz, formación de tubos de lava y el lajeamiento. El contacto lateral se acuña disconformemente hacia el sur del Virilla con la Formación Grifo Alto, según observamos su posición en los tajos de la Constructora Belén y Meco, y de pozos existentes en el área de Lindora y Pavas, de modo que han venido a rellenar una paleotopografía de cañones, y rodeando colinas, algunas de las cuales quizás realizaban un relieve de escarpe de falla bajo las cercanías del actual río Virilla (Figura 4). En el tajo Guacalillo se observa el contacto superior que es disconforme con la capa de pómez y las ignimbritas de la Formación Tiribí (Figura 5). En el contacto entre las lavas y la capa de pómez es usual ver la salida de agua debido al cambio litológico. Tanto en el deslizamiento como en el tajo Guacalillo, se observó la capa de pómez húmeda pero no la salida de agua.

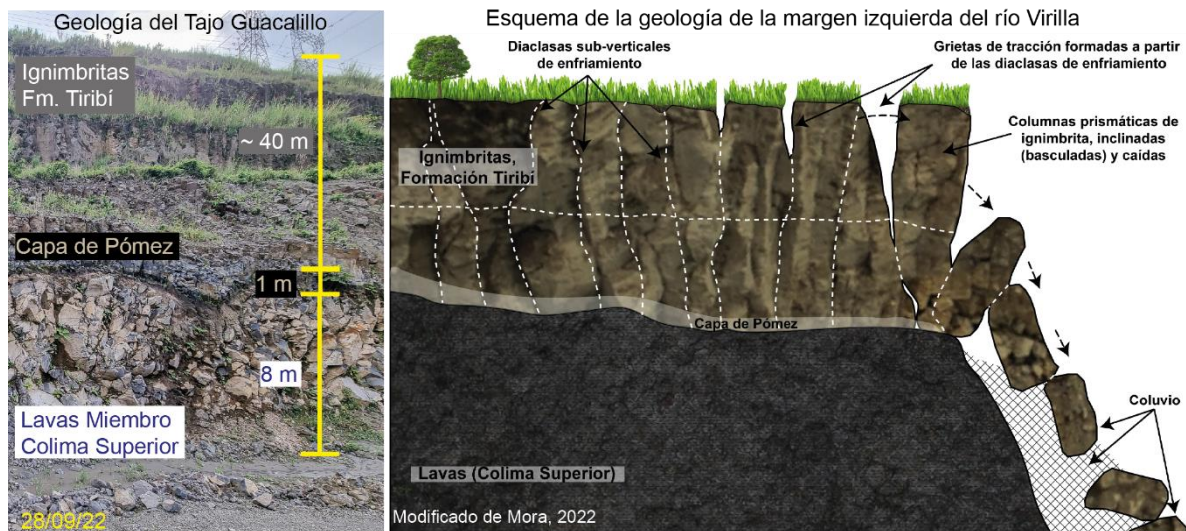


Figura 5. Geología observada en el tajo Guacalillo y Esquema interpretativo de los materiales presentes y sus formaciones geológicas respectivas en el deslizamiento del río Virilla

Los espesores varían desde unos 20 m hasta casi 100 m, pero el promedio anda por los 30 m de espesor, desapareciendo hacia Electriona y el suroeste del subsuelo del cantón de Belén, en el tajo Guacalillo se observó un espesor de 8 m (Figura 4) pero, puede continuar al menos por otros 20 m, como se observa en el cañón del río Virilla. Kussmaul (1988) había calculado un espesor promedio de 97 m para todo Colima y un volumen de 35 km<sup>3</sup> para toda la formación, pero hay motivos para suponer que el volumen total es superior. Gans et al. (2003), con base en varias edades obtenidas con 40Ar/39Ar, establecen su edad en 0,330 Ma, sin detallar localidades, y el Miembro Linda Vista (datado en el Tajo Pedregal), 371 ± 49 ka o bien 337 ± 7 ka. La mejor edad establecida es 330 mil años (Pérez et al., 2006).

En general la Formación Colima comprende cerca de medio millón de años y documenta parte de la Proto y paleo Cordillera Central. Aún debe aclararse la estratigrafía total de Colima Inferior. El origen de Colima Superior se propone como fracturas en la base de la actual cordillera, en su flanco suroeste, desde las cercanías del actual Poás hasta las cercanías de San Isidro de Heredia, en contraposición con la propuesta de Kussmaul (1988), que propone fracturas más hacia el río Virilla.



### II.3.4 Formación Tiribí

Son ignimbritas que han dejado una topografía casi plana característica, reconocible y descrita en la sección de geomorfología. 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 se han expuesto para la explotación de sus materiales (Figura 4). 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 (Figura 5) (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. Tiene espesores de hasta 30 metros en el Tajo Guacalillo (ubicado frente al deslizamiento analizado en este informe), 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 km<sup>3</sup>. Kutterolf et al. (2008) recalcularon cerca de 80 km<sup>3</sup>, y Soto et al. (2008) han propuesto que puede alcanzar los 100 km<sup>3</sup>. 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 la RN-27 y alrededores, como, en el sector sur antes del puente del Virilla. 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 ± 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.4 Tectónica local

En esta sección se describe la principal estructura tectónica presente en la zona de investigación en detalle (Figura 4). Se usa la información de Ruiz & Soto 2014 donde para la zona de estudio en detalle se proponen el trazo de la falla Paleo Virilla con base en el estudio de fotografías aéreas y la utilización del modelo de elevación digital generado con la información lidar 2014 de la CNE. A continuación, se describen los aspectos más relevantes de esta falla.

### II.4.1 Falla Paleo Virilla

Corresponde con una posible falla oculta fue descrita por Ruiz & Soto 2014, quienes indican que sigue el rumbo del cauce del río Virilla entre Puente de Mulas y las inmediaciones de la represa hidroeléctrica de Brasil de Oro en Santa Ana con una extensión de casi 10 km. El frente de montaña previo a la depositación de las secuencias volcánicas de Colima, Tiribí y Barva, sería su expresión morfológica, de modo que sería la responsable de tal y como se veía el Valle Central Occidental Oeste hace 1 Ma. Su movimiento aún no está determinado, pero la falta de escarpes en esta zona sugiere que podría tener un movimiento de rumbo e inversa con una pequeña componente vertical.

Esta falla estimada, podría ser una continuación de la Falla Virilla, la cual tiene un desplazamiento de rumbo y fue la causante del Terremoto de Piedras Negras Ms 6,2 del 22 de diciembre de 1990 (según Barquero et al., 1991). También, fuera del área de estudio, pero continuando hacia el oeste con la traza de esta posible falla se ha estimado la ubicación del epicentro para el terremoto del 10 de junio de 1835 y que causó daños en Alajuela y Escazú (Peraldo & Montero, 1999).



### II.5 Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Santa Ana

En cuanto a las amenazas que posee la zona en estudio, en la Figura 6 se presenta el mapa de amenazas y peligros confeccionados por la Comisión Nacional de Emergencias para el Cantón de Santa Ana, 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 ríos y quebradas, sin embargo, en las cercanías no se identifican zonas con potencial de inundación, zonas de falla o deslizamientos.

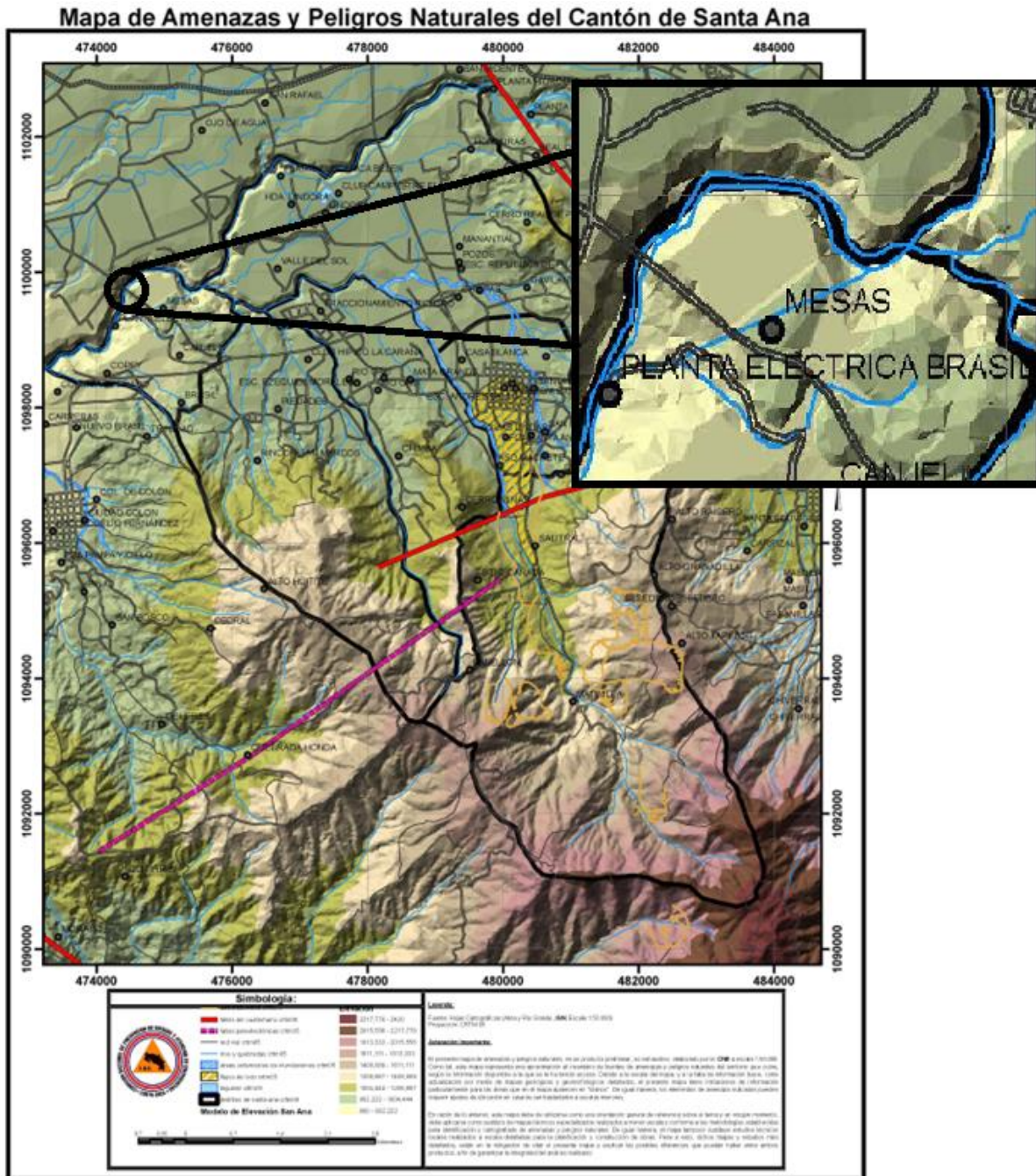


Figura 6. Mapa de amenazas y peligros naturales del cantón de Santa Ana



## II.6 Condición actual

Actualmente el sitio se encuentra con vegetación autóctona densa en la margen izquierda del río tal y como se observa en la Figura 7, además, el material deslizado se encuentra acumulado al pie del talud. Cabe resaltar que la vegetación es una limitante para obtener con mayor precisión la topografía del talud en la margen izquierda del río Virilla, sobre el cual se ubica el bastión izquierdo del puente. Se realizaron levantamientos de las características del sitio mediante inspección en campo, se aplicaron criterios geotécnicos y se tomaron muestras para obtención de propiedades geomecánicas de la roca que aunado al uso de equipos tecnológicos, fue posible la generación del modelo de elevación digital del sitio.

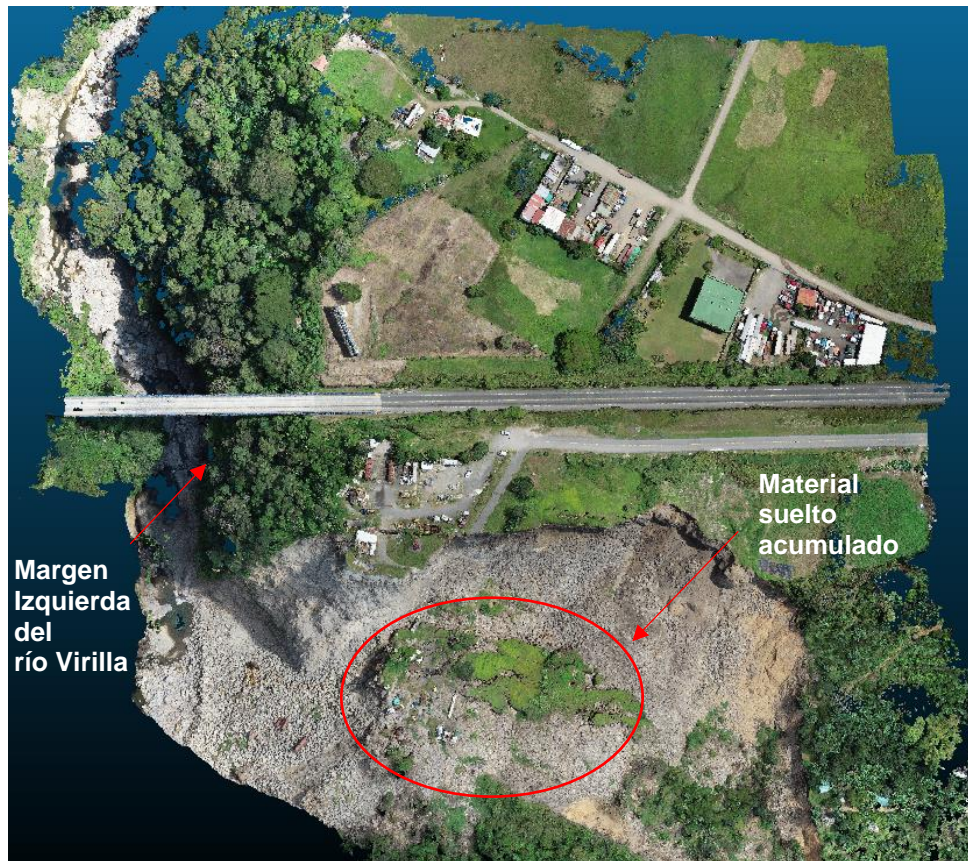


Figura 7. Situación actual del sitio de análisis

Es importante mencionar que, durante las visitas realizadas, se observaron dos principales zonas agrietadas en el terreno, espaciadas aproximadamente 20 m de centro a centro de las grietas. La más cercana a la carretera se encuentra aproximadamente a 50 m. Adicionalmente, en una de las visitas fue posible observar desde el pie del deslizamiento que, en apariencia la pendiente residual cuenta con una inclinación que favorece la estabilidad del sitio, dicha situación se observa en la Figura 8.



Figura 8. Vista desde el pie del deslizamiento, pendientes residuales en apariencia a favor de la estabilidad

### III. Descripción del trabajo realizado

Debido al deslizamiento ocurrido en las cercanías del río Virilla sobre la RN N°27 en el Km 17+065, que destacan evidencias de inestabilidad en el terreno que justifican la necesidad de realizar un análisis de estabilidad del sitio, dada la posible condición de vulnerabilidad en la que se encuentra la estructura del puente y la proximidad de la Ruta Nacional 27, el Programa de Ingeniería Geotécnica del LanammeUCR procedió a realizar los análisis de carácter preliminar que se presentan a continuación, considerando la limitante de no contar con una campaña geotécnica exhaustiva para determinar las propiedades de los materiales de la zona. A continuación, se muestra el trabajo realizado para poder desarrollar los análisis preliminares.

#### III.1 Modelo de elevación digital (MED)

Inicialmente, con la colaboración de la Unidad de Gestión de Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) del Programa de Ingeniería del Transporte del LanammeUCR, se realizó el levantamiento del sitio con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) de la zona de interés.

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 respetan 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 por el VANT de la UGERVN, fue posible obtener el modelo de elevación que se muestra en la Figura 9. Como se observa, el levantamiento realizado permitió recrear el terreno para su posterior análisis.



Figura 9. Nube de puntos obtenida de la zona de estudio como resultado del levantamiento realizado con el VANT

Dadas las dimensiones de la zona de estudio y la topografía actual del sitio resultante posterior al deslizamiento, el modelo está constituido por una gran cantidad de puntos a diferentes elevaciones, que exceden la capacidad de procesamiento del equipo disponible. Por lo tanto y para un adecuado manejo de los datos, se procedió a dividir el MED en tres secciones de interés, tal y como se observa en la Figura 10.



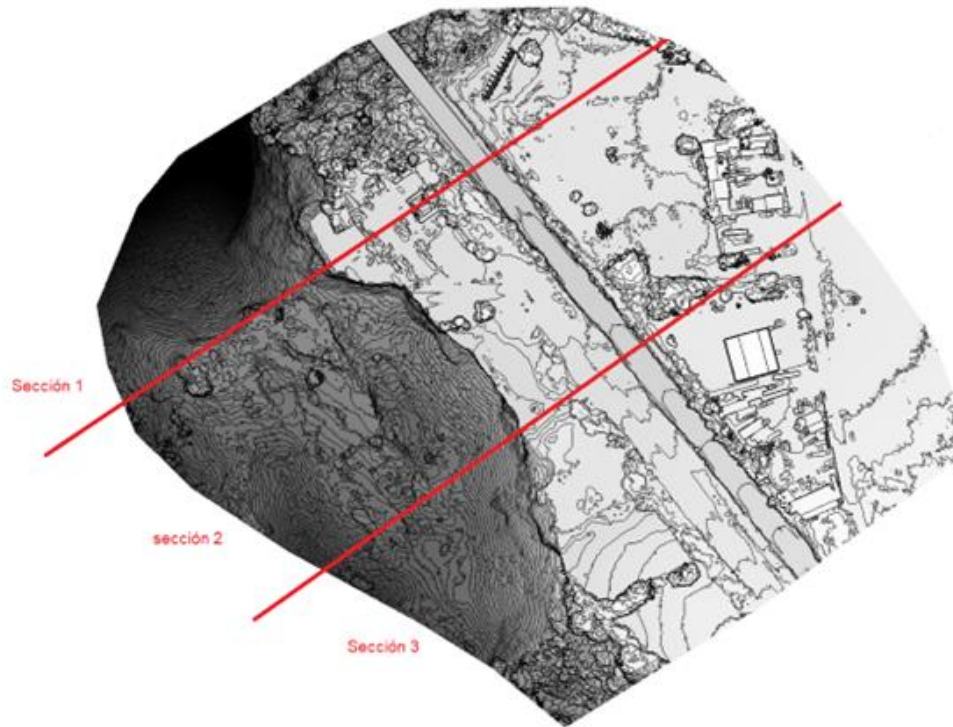


Figura 10. Definición de secciones para análisis del MED del sitio

Con la ayuda del software QGIS fue posible utilizar el modelo de elevación digital de cada una de las secciones para generar las curvas de nivel representativas de la superficie del terreno, las curvas de nivel fueron calculadas a intervalos de 1,5 m.

### III.2 Caracterización y clasificación del macizo rocoso

Durante la visita, en general, se observaron agrietamientos en el terreno producto del deslizamiento ocurrido tras las fuertes lluvias que se presentaron durante horas de la madrugada del 18 de setiembre del presente año.

Inicialmente tal y como se observa en la Figura 11, se identifican tres zonas de agrietamiento del terreno ubicadas aproximadamente a 100 m, 76 m y 55 m desde la zona correspondiente al derecho de vía de la RN N°27. El bloque ubicado a 100 m del cimiento del puente sobre el río Virilla en la RN N°27, se considera el bloque más inestable. Por su parte el agrietamiento ubicado a 55 m conforma un bloque que en la condición actual se encuentra confinado, sin embargo, dado el agrietamiento ante una condición de fuertes lluvias, sismo o ambas, podría eventualmente presentarse un deslizamiento de dicha zona.



Figura 11. Condición del sitio afectado por el deslizamiento de la margen del río Virilla, km 17+065 de la RN N°27

En la Figura 12 se observa una imagen aérea de la zona de estudio obtenidas a partir del levantamiento con un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) realizado por la UGERVN - PITRA del LanammeUCR, donde se observa que la zona de estudio está constituida por taludes en roca fracturada, por lo que para la clasificación del macizo rocoso se utilizó el método del índice geológico de resistencia, GSI (geological strength index), que evalúa la calidad del macizo en función del grado y las características de fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades. Con esta es posible clasificar el macizo del sitio en estudio.



Figura 12. Estado del macizo rocoso para su clasificación con el sistema GSI

El GSI es un sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo, desarrollado por Hoek (1994) para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR (rock mass rating, desarrollado por Bieniawski en 1972). Las observaciones toman en cuenta el nivel de alteración de la roca, la condición de las discontinuidades (forma, rugosidad, relleno, entre otros), además se observa la condición en la que se encuentra la cara del talud, erosión, textura, recubrimiento. Este índice puede variar de 0 a 100 y permite clasificar al macizo en alguna de las 5 clases definidas en el método, a saber:



- Muy Mala ( $0 \leq \text{GSI} \leq 20$ )
- Mala ( $20 < \text{GSI} \leq 40$ )
- Regular ( $40 < \text{GSI} \leq 60$ )
- Buena ( $60 < \text{GSI} \leq 80$ )
- Muy Buena ( $80 < \text{GSI} \leq 100$ )

Se recomienda que el valor del GSI se estime utilizando directamente el gráfico que se presenta en la Figura 13.

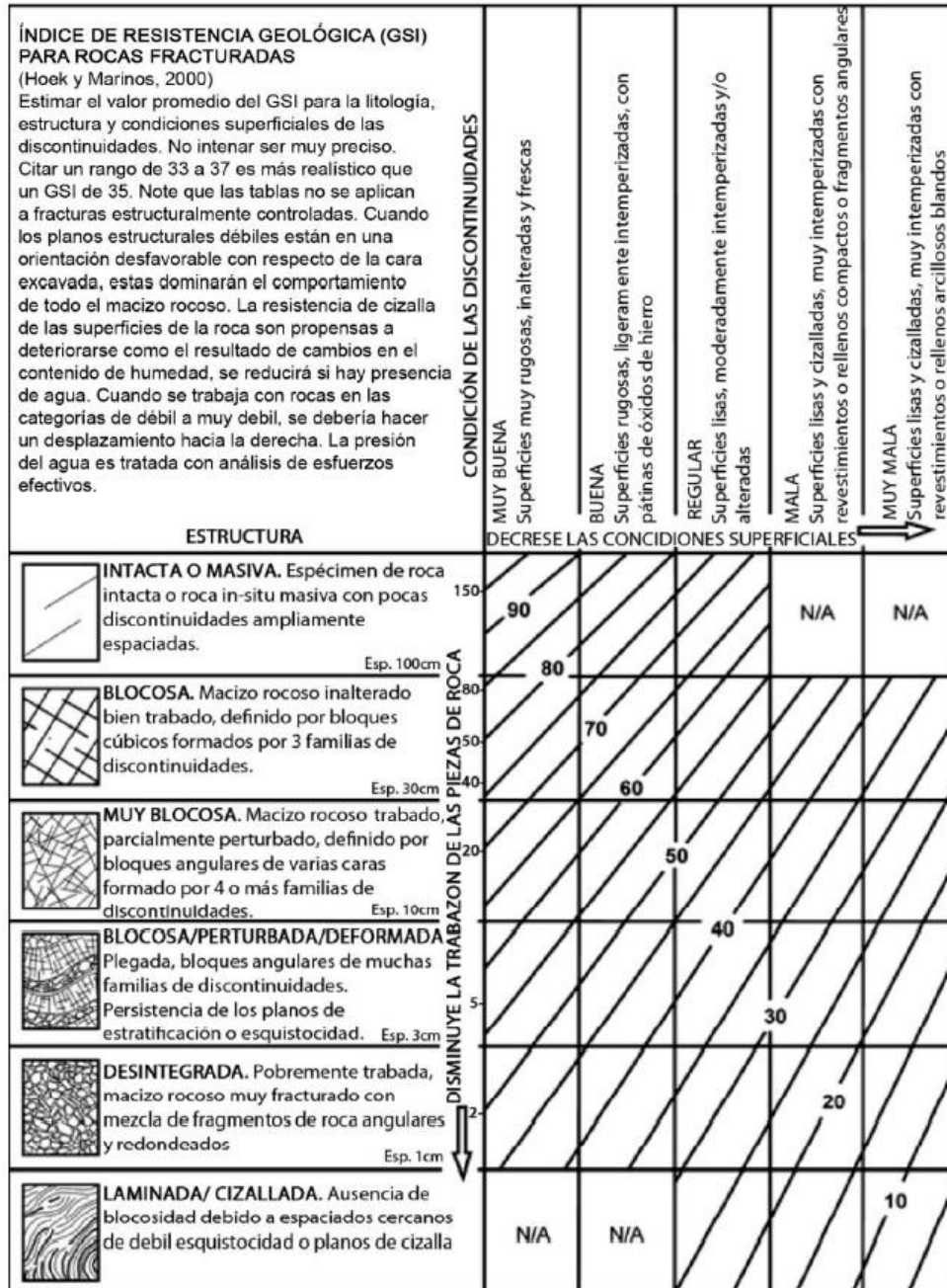


Figura 13. Caracterización de un macizo rocoso fracturado en función de la trabazón del macizo y las condiciones de sus discontinuidades





Como se observa en la Figura 12, el terreno se conforma por un perfil rocoso, medianamente fracturado y alterado. La superficie se observa parcialmente meteorizada. Dada esta caracterización basada en la inspección visual y análisis de los productos obtenidos gracias a las imágenes aéreas, se asigna un valor de GSI en un rango de 35 a 40), es decir un macizo rocoso de calidad mala a regular y para efectos del presente análisis preliminar se utiliza un **GSI=35**

Hoek y Brown proponen un criterio generalizado para estimar los esfuerzos principales en macizos rocosos fracturados de mala calidad, con materiales blandos y alterados, con base en la ecuación ( 1 ):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (1)$$

donde:

$\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos principales mayor y menor en la ruptura respectivamente

$\sigma_{ci}$  es la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa

m, s y  $\alpha$  dependen de las propiedades y características del macizo rocoso y que se definen por las ecuaciones ( 2 ), ( 3 ), ( 4 ), ( 5 ) y ( 6 )

$$m = m_i \exp \frac{GSI - 100}{28} \quad (2)$$

Si  $GSI > 25$  (roca de calidad buena a razonable):

$$s = \exp \left( \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (4)$$

Si  $GSI < 25$  (roca de calidad pobre):

$$s = 0 \quad (5)$$

$$\alpha = 0,65 - \frac{GSI}{200} \quad (6)$$

donde  $m_i$  es el valor correspondiente a la matriz rocosa, que se obtiene en ensayos de compresión triaxial. La Tabla 1 muestra los valores típicos para diferentes tipos de roca que pueden utilizarse.



Tabla 1. Valores de la constante  $m_i$  para roca intacta, por tipo de roca\*

Tipo de roca	Clase	Grupo	Textura				
			Gruesa	Media	Fina	Muy fina	
Sedimentarias	Clásticas		Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limolita 9	Arcillolita	
			Grauwaca (18)				
			Creta 7				
	No Clásticas	Orgánicas		Carbón (8-21)			
		Carbonatos	Brechas (20)	Caliza Esparítica (10)	Caliza Micrítica 8		
		Químicas		Yeso 16	Anhidrita 13		
Metamórficas	No Foliadas		Mármol 9	Rocas Córneas (19)	Cuarcita 24		
	Levemente Foliadas		Migmatita (30)	Anfibolita 25-31	Milonitas (6)		
	Foliadas		Gnesis 33	Esquistos 4-8	Filitas (10)	Pizarras 9	
Ígneas	Intrusivas	Claras	Granito 33		Riolita (16)	Obsidiana (19)	
			Granodiorita (30)		Dacita (17)		
			Diorita (28)		Andesita 19		
	Oscuras	Gabbro 27	Dolerita (19)				
		Norita 22		Basalto (17)			
	Extrusivas piroclásticas		Aglomerados (20)	Brechas (18)	Tobas (15)		

(\*): Los valores entre paréntesis corresponden a estimaciones


De acuerdo con la caracterización geológica del sitio mostrada en los apartados II.2 y II.3, según los materiales presentes y la formación rocosa característica de la zona de estudio corresponden a rocas ígneas oscuras por lo que se clasifican según la Tabla 1 como basaltos y se asigna el valor de  $m_i=17$ .

Para tener en consideración el grado de perturbación del macizo debido a los daños por voladura y relación tensional, el criterio generalizado de Hoek y Brown define un parámetro adicional llamado factor de disturbación, D. Este depende del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos. Este valor varía desde 0 para macizo inalterados hasta 1 para macizos muy alterados, la Tabla 2 muestra una guía para estimación del factor de alteración. En la Tabla 2 se indican los valores para estimar el grado de alteración según sea el caso observado en sitio.



Tabla 2. Guía para la estimación del factor de alteración del criterio de falla de Hoek & Brown.

Apariencia del macizo	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	<p>Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel</p>	<p>D=0</p>
	<p>Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladura) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante.</p> <p>Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía</p>	<p>D=0 D=0,5</p>
	<p>Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3m en el macizo rocoso circundante</p>	<p>D=0,8</p>
	<p>Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo, la liberación de tensión resulta en alguna alteración.</p>	<p>D=0,7 Buena voladura D1,0 Voladura pobre</p>

	<p>Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento.</p> <p>En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.</p>	<p>D=1,0 Voladura de producción</p> <p>D=0,7 Excavación mecanizada</p>
---	--	--

Dada la ubicación del talud, se asigna un valor **D=0,7**, ya que algunas zonas corresponden a talud natural deslizado y otras zonas fueron cortados de manera mecanizada para la construcción de algunas de las estructuras cercanas.

Finalmente, se recolectaron muestras de roca en tres diferentes puntos de la zona de estudio para la determinación en laboratorio de su resistencia a la compresión confinada, de acuerdo con la norma ASTM 7012 “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)”. Por lo tanto, se estimó un valor promedio de la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, UCS (uniaxial compressive strength) a partir de los resultados de ensayos de laboratorio realizados en los tres puntos específicos, dos de ellos localizados en el interior de la grieta ubicada a 55 m y uno en el pie del talud justo en el cauce del río. Los resultados se encuentran en el informe EIC-Lanamme-INF-1700-2022 (que se adjunta), cuyo valor promedio se estimó en UCS = 15430 kPa

En la aplicación del GSI para utilizarlo dentro del criterio generalizado de Hoek y Brown en la interpretación de los valores de resistencia obtenidos debe tenerse en cuenta que:

- El criterio es válido únicamente para macizos rocosos con comportamiento isotrópico
- El índice GSI se basa en estimaciones cualitativas y en modelos simples que rara vez coinciden con las condiciones reales
- Los resultados deben ser cotejados con otros métodos y, siempre que sea posible, con datos de campo y análisis a posteriori (back analysis)

La Tabla 3 muestra un resumen de los parámetros a utilizar para los análisis de estabilidad de cada una de las secciones que conforman la zona de interés.

Tabla 3. Parámetros geomecánicas del macizo rocoso

GSI	$m_i$	D	UCS (kPa)	Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )
35	17	0,7	15430	19.8

### III.3 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 la resolución de la estabilidad un problema estáticamente indeterminado.



Todos 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 medio y el riesgo de daños económicos y ambientales en un nivel medio, para lo cual es aceptable un valor de factor de seguridad de **1,40** en condición estática. Para la condición de sismo (pseudo-estática) se utiliza el coeficiente de aceleración del suelo de **0,10 g** definido en el CGTLCR para el sitio ubicado en Zona III con tipo de suelo S1, para lo cual es aceptable un valor de factor de seguridad de **1,05**.

No obstante, es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos de esta región ya que, la información disponible y el estudio completo correspondiente, deben ser asignados a un profesional en geotecnia responsable del análisis y propuestas de implementación de obras de estabilidad de taludes por parte 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.

Teniendo en consideración la cercanía con la carretera RN N°27 y la estructura del puente sobre el río Virilla, se utilizó el Modelo de Elevación Digital (MED) obtenido con ayuda del VANT, los parámetros y propiedades de los materiales estimados anteriormente y el uso del software SLIDE3 del paquete de programas de RocScience, para llevar a cabo un análisis de estabilidad de taludes de las tres secciones mencionadas anteriormente. A continuación, se comentan los detalles de cada análisis realizado.

### **III.3.1 Resultado de estabilidad de la sección 1 utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL)**

La Figura 14 muestra el MED levantado por el VANT para la sección 1 del sitio de análisis, donde la escala de colores representa las elevaciones del terreno. Los colores azules representan los puntos con mayores alturas, el color verde alturas intermedias y los colores rojos los puntos más bajos.



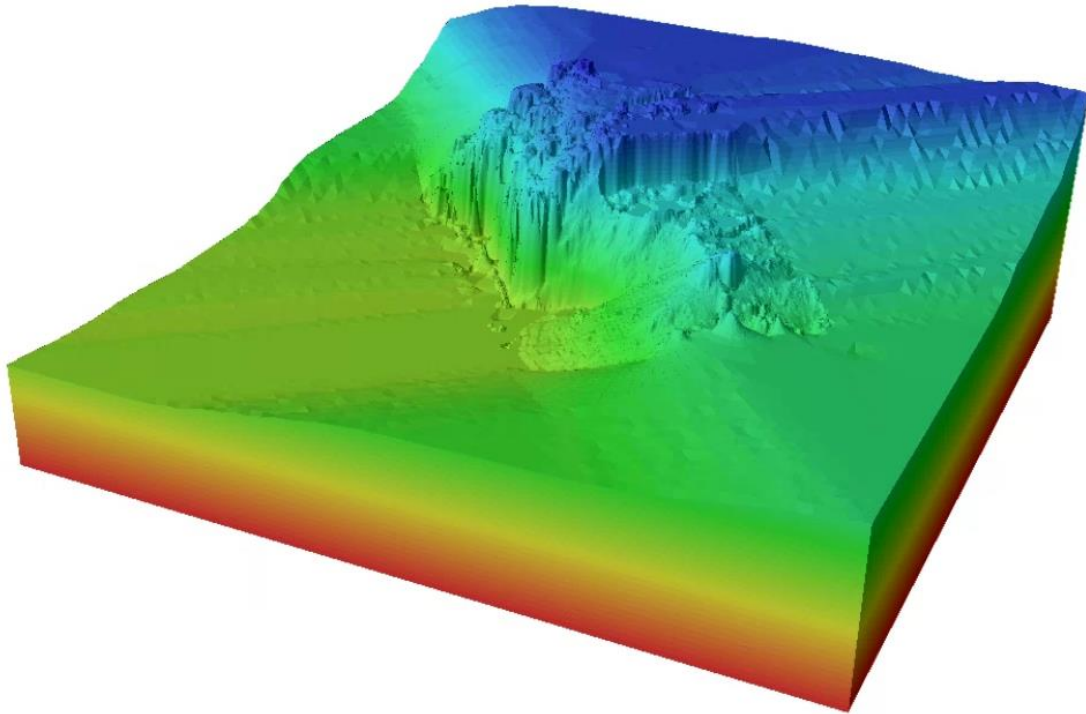


Figura 14. Modelo de elevación de la sección 1 del área de estudio próxima al puente sobre el río Virilla en la RN27 utilizando el software SLIDE3

Para realizar los análisis lo más cercanos a las condiciones de operación de la zona de estudio, se utiliza una carga viva correspondiente al tránsito vehicular de 10 kPa. Según lo indicado en la AASHTO para el análisis longitudinal de cargas vivas vehiculares en claros de longitud mayores que 30 m, la sobrecarga del carril se estima como un esfuerzo de acuerdo con la siguiente ecuación ( 7 ):

$$\sigma_v = 10 \text{ kPa} \times n \quad (7)$$

Donde n es el factor por número de carriles según la siguiente tabla:

Tabla 4. Factor de ajuste a sobre carga por número de carriles

Número de carriles	Factor n
1	1,20
2	1,00
3	0,85
>3	0,65

Para este caso, el factor n es igual a la unidad ya que la sección analizada cuenta con 1 carril por sentido.

En la Figura 15 se muestran los mapas de factores de seguridad y el histograma con la escala de colores para la apropiada interpretación de los mapas sobre la superficie analizada tanto para la condición estática como pseudo-estática, utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop.

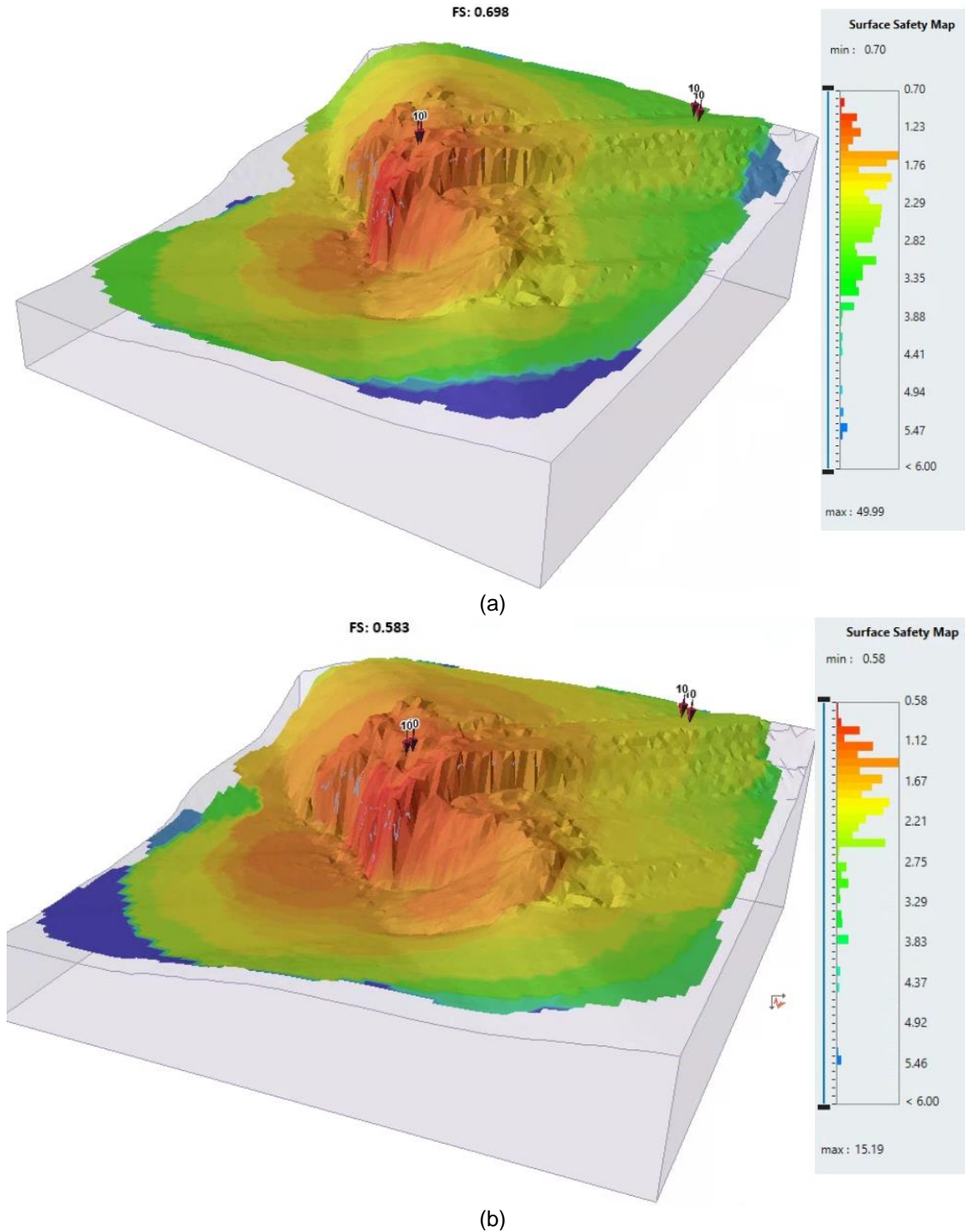


Figura 15. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Bishop en el software SLIDE3 de la sección 1 para las condiciones (a) estática (b) pseudo-estática

Como se puede observar los factores de seguridad más bajos se concentran en la margen del talud que conforma el cañón del río, y no cumplen con lo indicado en el CGTLCR de 1,40 y 1,05 para la condición estática y pseudo-estática respectivamente. Sin embargo, esta zona presenta limitaciones en el MED, ya que, al estar cubierta por una vegetación densa, mediante la metodología de fotogrametría no es posible obtener información real de la superficie del terreno, por lo que el modelo en esta zona debió ser extrapolado. Dada esta condición se decidió hacer un análisis de estabilidad del talud en la zona específica. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 16.

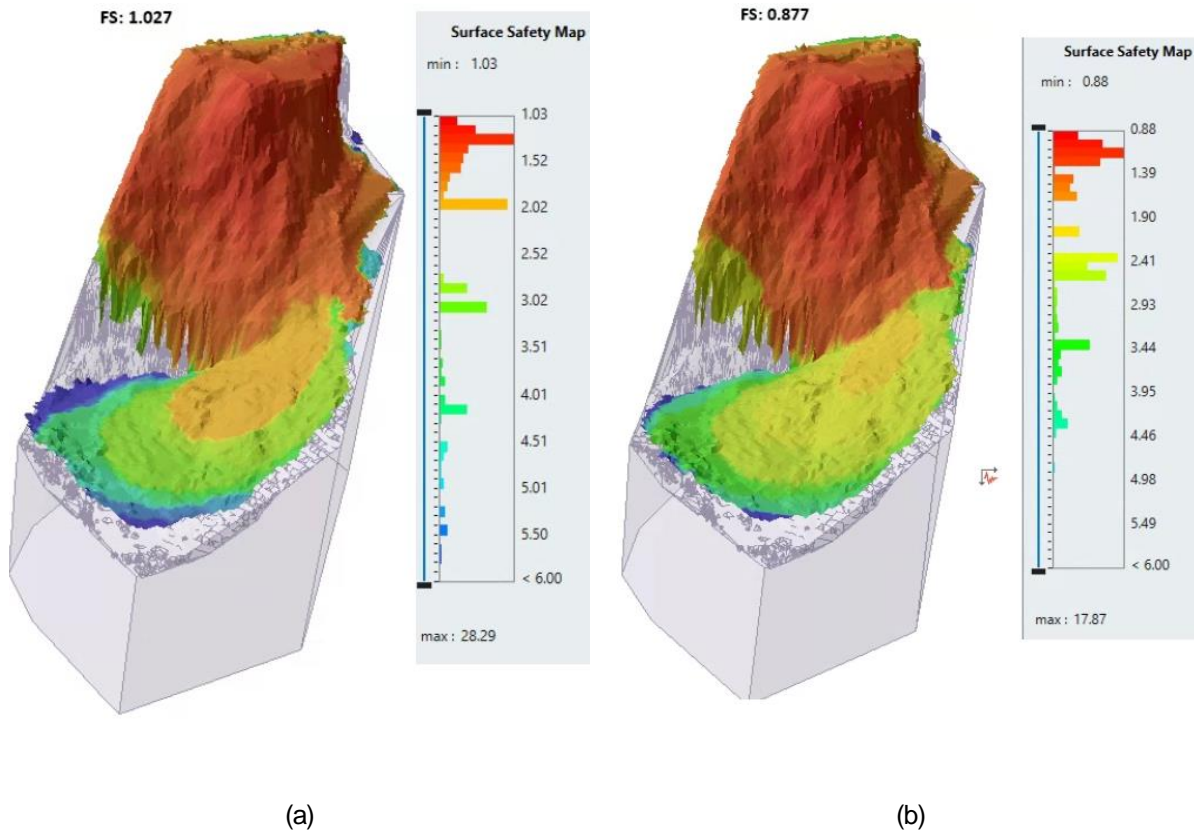


Figura 16. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Bishop en el software SLIDE3 de la subsección 1 para las condiciones (a) estática (b) pseudo-estática

Al analizar los mapas de factores de seguridad y el histograma con la escala de colores para la apropiada interpretación de los mapas sobre la superficie analizada, es posible afirmar que esta es una zona crítica que en condición estática se encuentra en equilibrio límite desplegando un factor de seguridad de 1,0. Mientras que, para la condición con carga sísmica aplicada, el talud podría presentar problemas de estabilidad.

Por su parte, en la Figura 17, se presentan los resultados cuando se ejecuta el análisis con la metodología de Janbu, en este caso los resultados son un poco más conservadores con factores de seguridades ligeramente inferiores a los obtenidos con Bishop, con valores de factores de seguridad para las condiciones estática y pseudo-estática respectivamente.



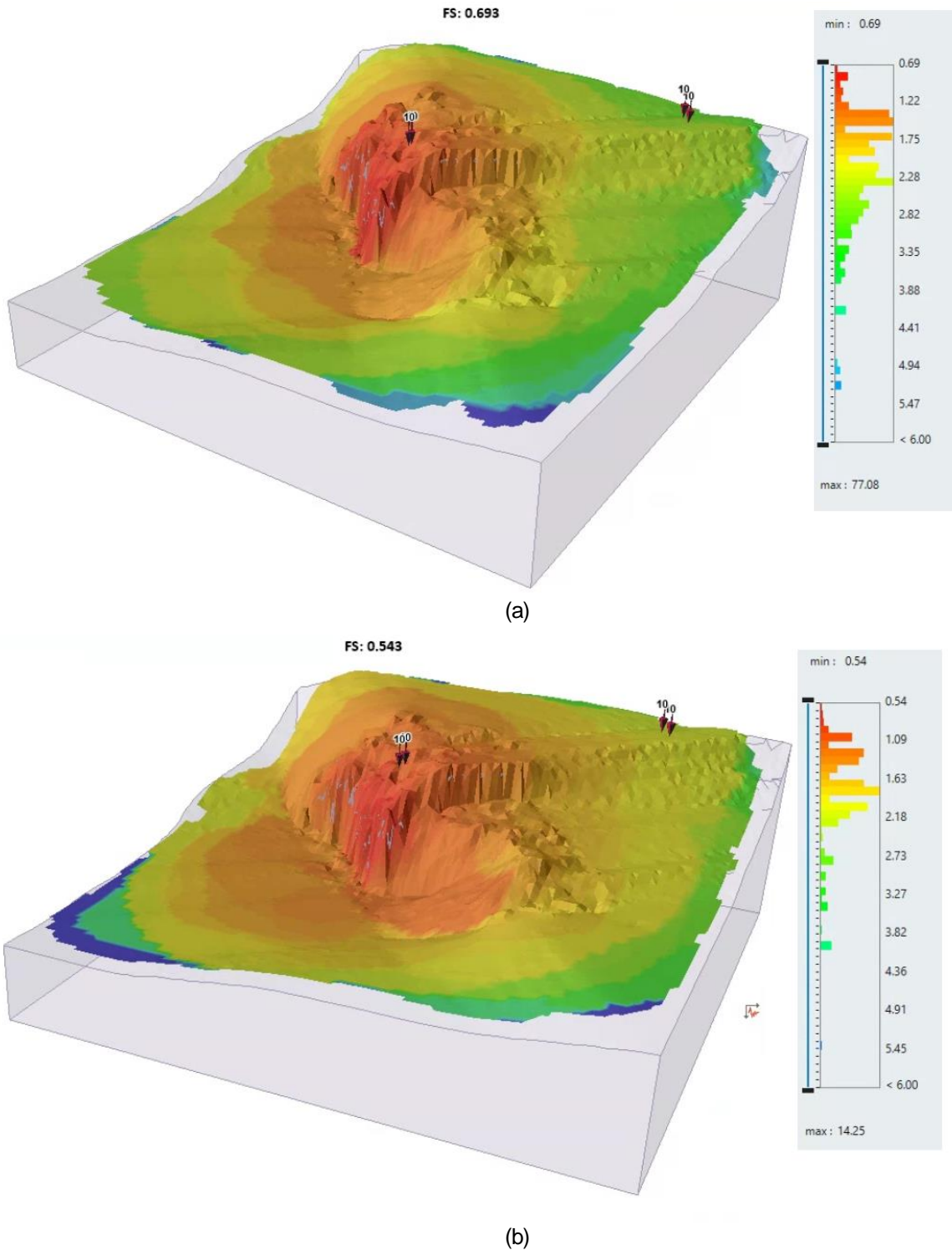


Figura 17. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Janbu en el software SLIDE3 de la sección 1 para las condiciones (a) estática (b) pseudo-estática

De igual manera que para el análisis con la metodología de Bishop, se realizó el análisis de estabilidad del talud para la zona específica del cañón del río Virilla, esto debido a que los factores de seguridad obtenidos no cumplen con lo indicado en el CGTLCR de 1,40 y 1,05 para la condición estática y pseudo-estática respectivamente. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, las superficies de falla críticas se concentran en la zona del cañón del río, misma que presenta limitaciones del MED para su adecuada interpretación. Los resultados obtenidos por el método de Janbu se muestran en la Figura 18.

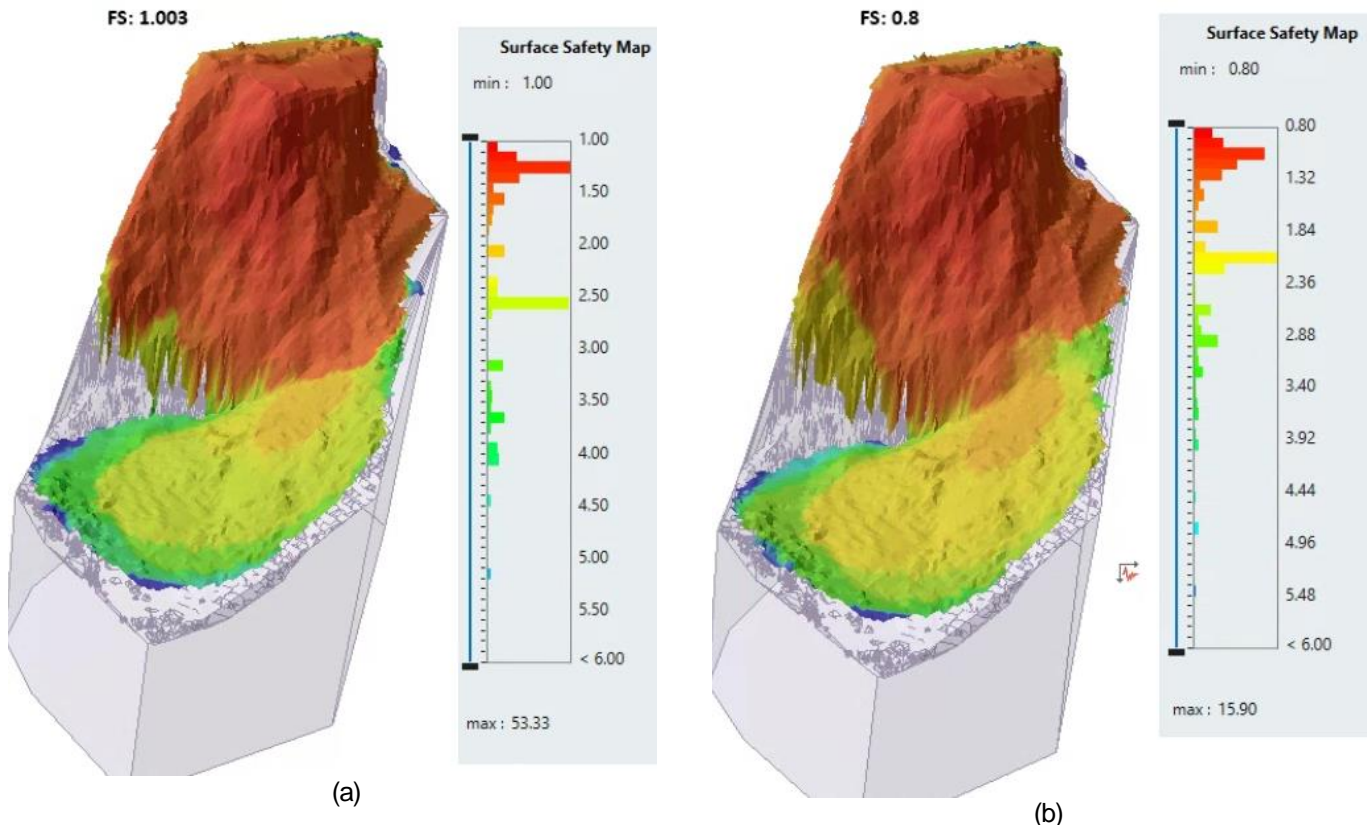


Figura 18. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Janbu en el software SLIDE3 de la subsección 1 para las condiciones (a) estática (b) pseudo-estática

Los factores de seguridad por la metodología de Janbu son más conservadores, pero mantiene el comportamiento de equilibrio límite en condición estática, e inestabilidad al aplicarse una carga sísmica.

Es importante resaltar que los factores de seguridad para los análisis de la sección 1 no cumplen con lo indicado en el CGTLCR de 1,40 y 1,05 para la condición estática y pseudo-estática respectivamente. Tras los resultados obtenidos se puede concluir que, para esta sección en específico, en la situación actual el sitio se encuentra en equilibrio límite, y la acción de un sismo o un eventual incremento en el volumen de precipitación, podrían detonar problemas de estabilidad de los bloques ubicados en la corona del talud en las márgenes que presenta pendientes prácticamente verticales. Sin embargo, son zonas muy localizadas e incluso superficiales, que no tendrían afectación directa con la RN N°27 o la cimentación del puente sobre el río Virilla.

### III.3.2 Resultado de estabilidad de la sección 2 utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL)

La Figura 19 muestra el MED levantado por el VANT para la sección 2 del sitio de análisis, donde la escala de colores representa las elevaciones del terreno. Los colores azules representan los puntos con mayores alturas, el color verde alturas intermedias y los colores rojos los puntos más bajos.

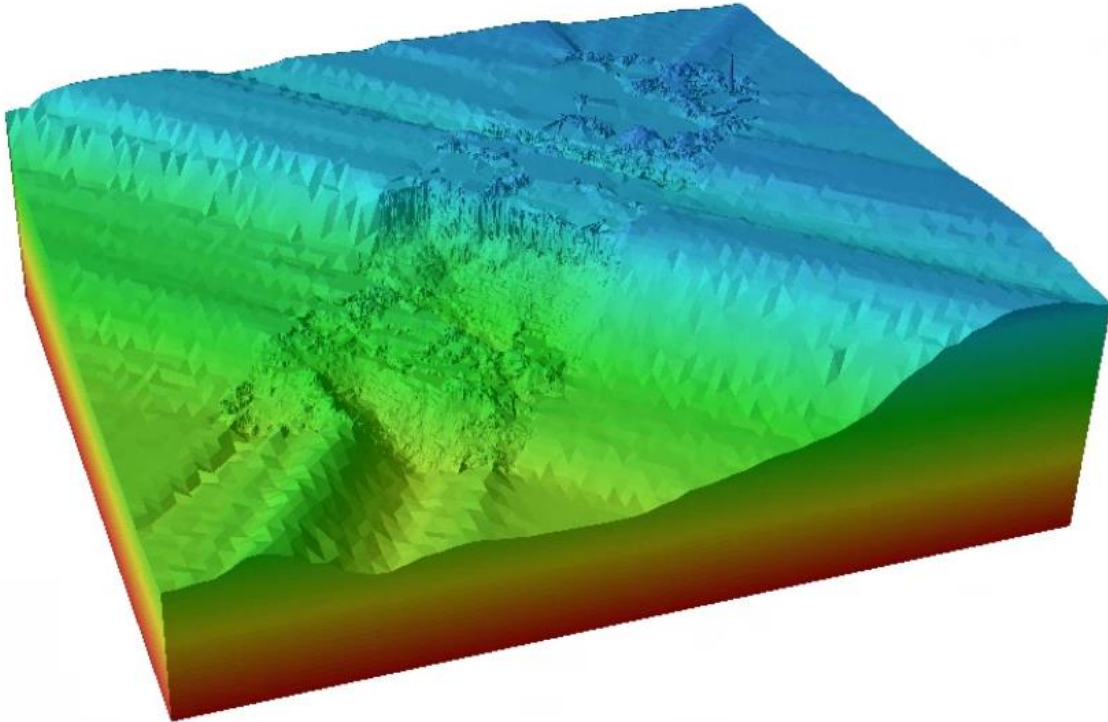


Figura 19. Modelo de elevación de la sección 2 del área de estudio próxima al puente sobre el río Virilla en la RN27 utilizando el software SLIDE3

En la Figura 20 se muestran los mapas de factores de seguridad y el histograma con la escala de colores para la apropiada interpretación de los mapas sobre la superficie analizada tanto para la condición estática como pseudo-estática, utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop.



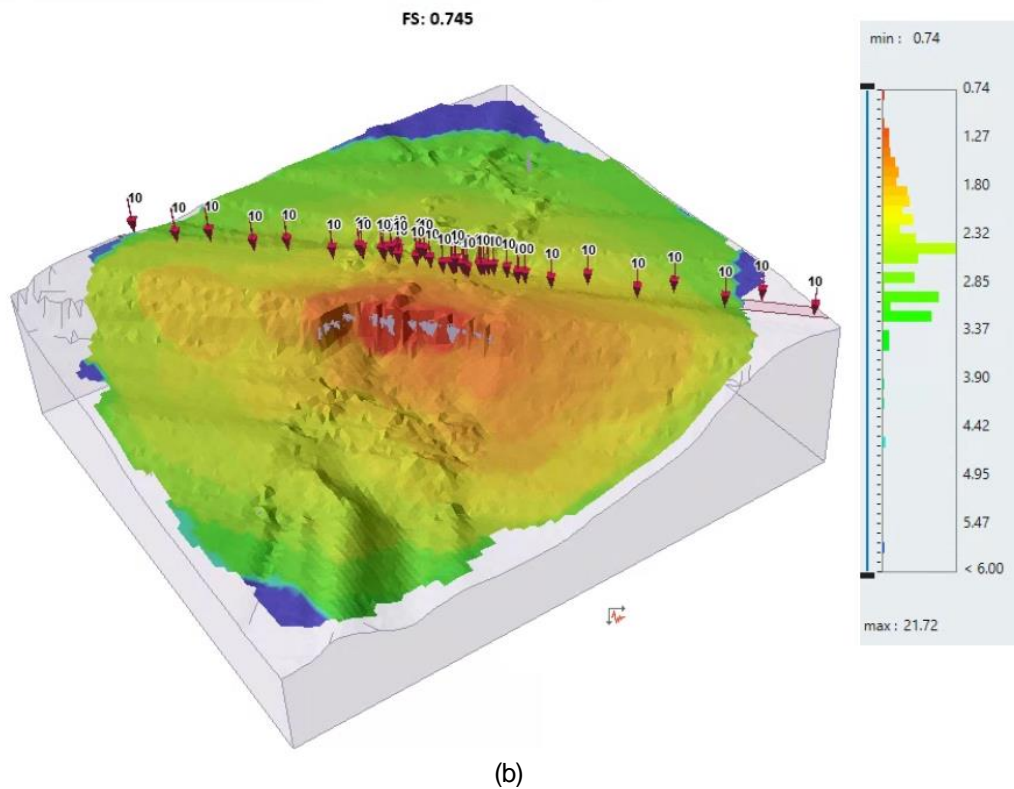
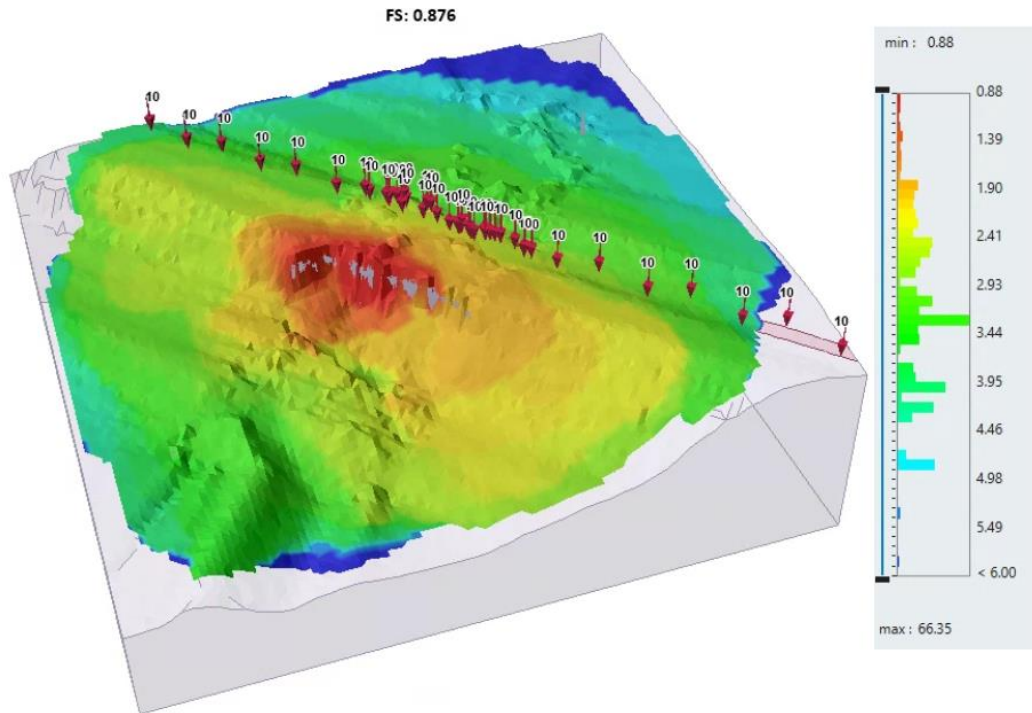


Figura 20. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Bishop en el software SLIDE3 de la sección 2 para las condiciones (a) estática (b) pseudo-estática



Como se observa en los resultados obtenidos, las zonas cercanas a la corona del talud presentan los factores de seguridad más bajos. Sin embargo, solo 1,30% de las superficies de falla tienen factores de seguridad inferiores a los recomendados por el CGTLCR, tal y como se observa en el histograma de factores de seguridad, la mayor parte del terreno presenta factores de seguridad mayores a 1,90 para la condición estática y 1,30 para la pseudo-estática.

Por su parte, en la Figura 21, se presentan los resultados cuando se ejecuta el análisis con la metodología de Janbu, en este caso los resultados son un poco más conservadores con factores de seguridad ligeramente inferiores a los obtenidos con Bishop, con valores de factores de seguridad para las condiciones estática y pseudo-estática respectivamente.

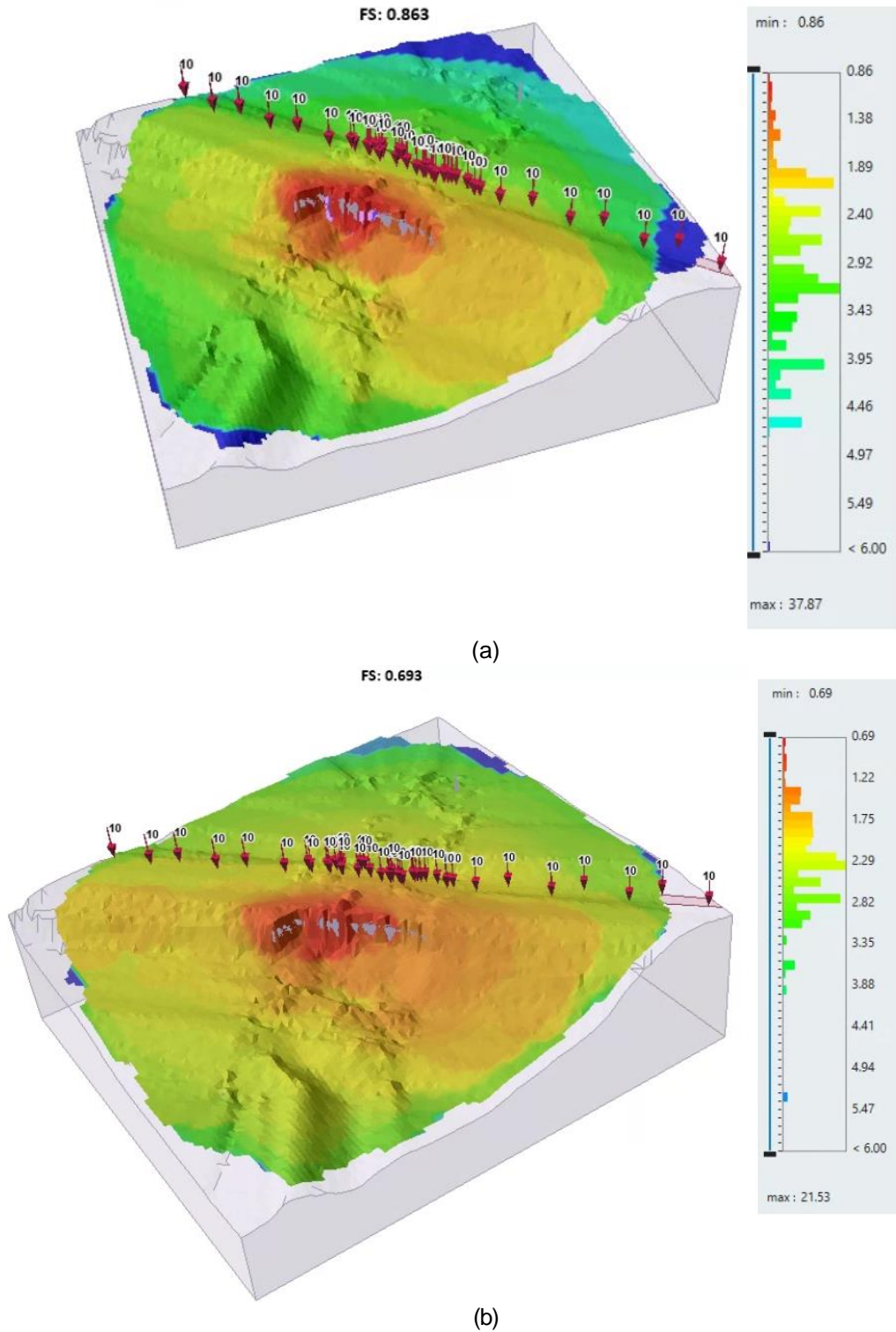


Figura 21. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Janbu en el software SLIDE3 de la sección 2 para las condiciones (a) estática (b) pseudo-estática



Al igual que para el análisis realizado con a la metodología de Bishop, los resultados obtenidos con Janbu presenta en las zonas cercanas a la corona del talud presentan los factores de seguridad más bajos, sin embargo, solo 1,71% de las superficies de falla tienen factores de seguridad inferiores a los recomendados por el CGTLCR, tal y como se observa en el histograma de factores de seguridad la mayor parte del terreno presenta factores de seguridad mayores a 1,89 para la condición estática y 1,30 para la pseudo-estática.

Al observar las condiciones del terreno actuales durante la visita de campo se concluye que los resultados obtenidos con los análisis por el MEL concuerdan con lo observado en sitio, ya que luego del deslizamiento la superficie del terreno presenta zonas agrietadas que generan algunos bloques inestables y con pendientes desfavorables para la estabilidad del talud. Una vez que el terreno adopte una pendiente favorable para la estabilidad del talud, es de esperar que, en condiciones de operación normales, la ruta no se vea afectada por temas de estabilidad. Además, como se observa en los mapas de superficies de deslizamiento, las zonas cercanas a la vía de la RN N°27 presenta factores de seguridad favorables según lo recomendado en el CGTLCR.

### **III.3.3 Resultado de estabilidad de la sección 3 utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL)**

Finalmente, para el análisis de la sección 3, la Figura 22 muestra el MED levantado por el VANT para la sección 3 del sitio de análisis, donde la escala de colores representa las elevaciones del terreno. Los colores azules representan los puntos con mayores alturas, el color verde alturas intermedias y los colores rojos los puntos más bajos.

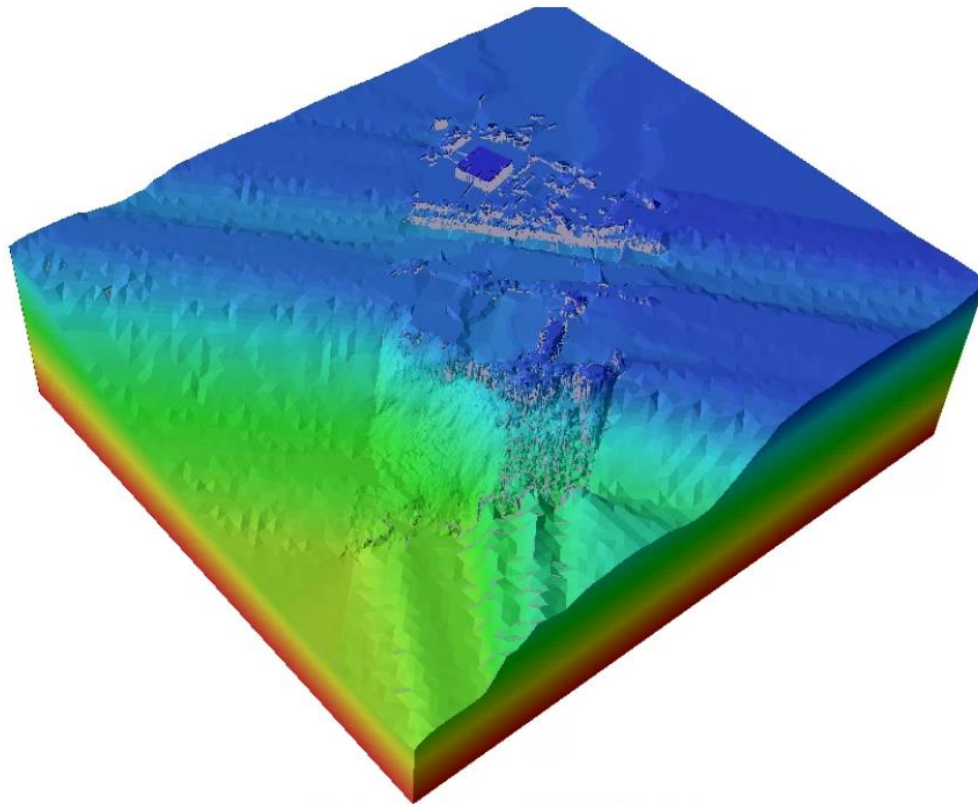
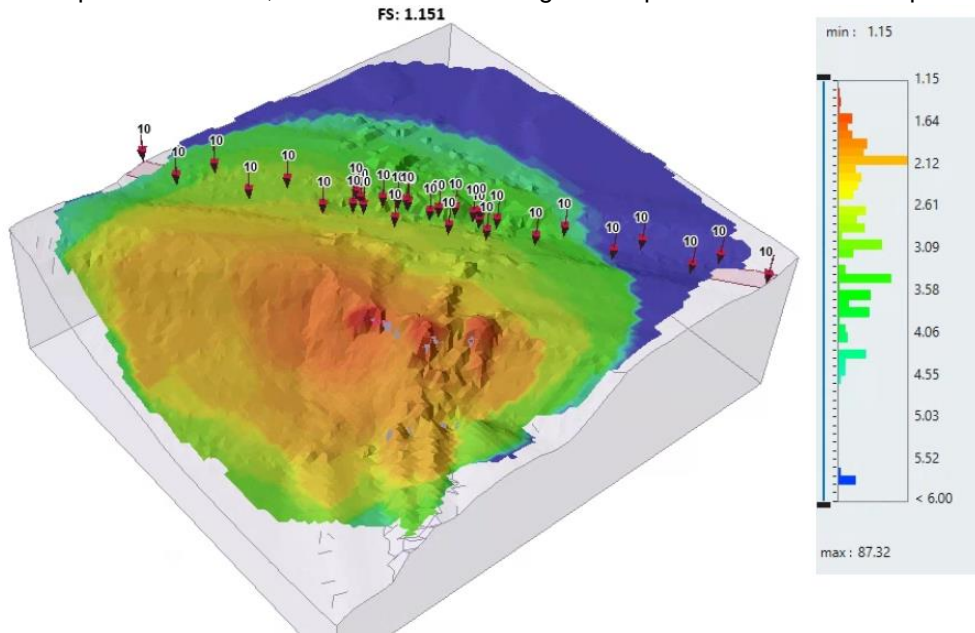
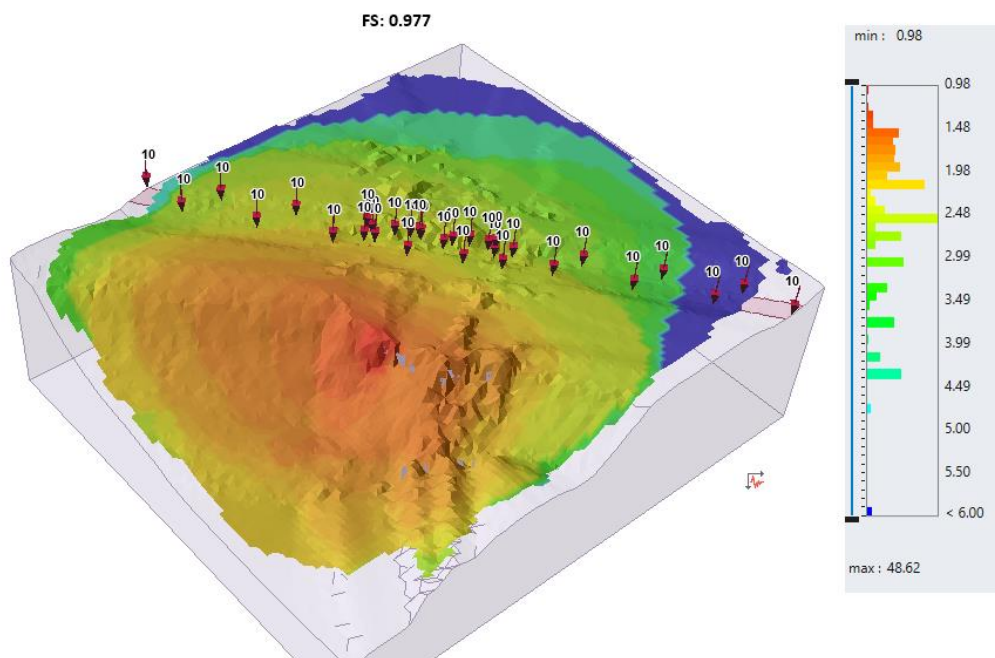


Figura 22. Modelo de elevación de la sección 3 del área de estudio próxima al puente sobre el río Virilla en la RN27 utilizando el software SLIDE3.

En la Figura 23 se muestran los mapas de factores de seguridad y el histograma con la escala de colores para la apropiada interpretación de los mapas sobre la superficie analizada tanto para la condición estática como pseudo-estática, utilizando la metodología de equilibrio límite de Bishop.



(a)



(b)

Figura 23. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Bishop en el software SLIDE3 de la sección 3 para las condiciones (a) estática (b) pseudo-estática

Por su parte, en la Figura 24, se presentan los resultados cuando se ejecuta el análisis con la metodología de Janbu, en este caso los resultados son un poco más conservadores con factores de seguridades ligeramente inferiores a los obtenidos con Bishop, con valores de factores de seguridad para las condiciones estática y pseudo-estática respectivamente.

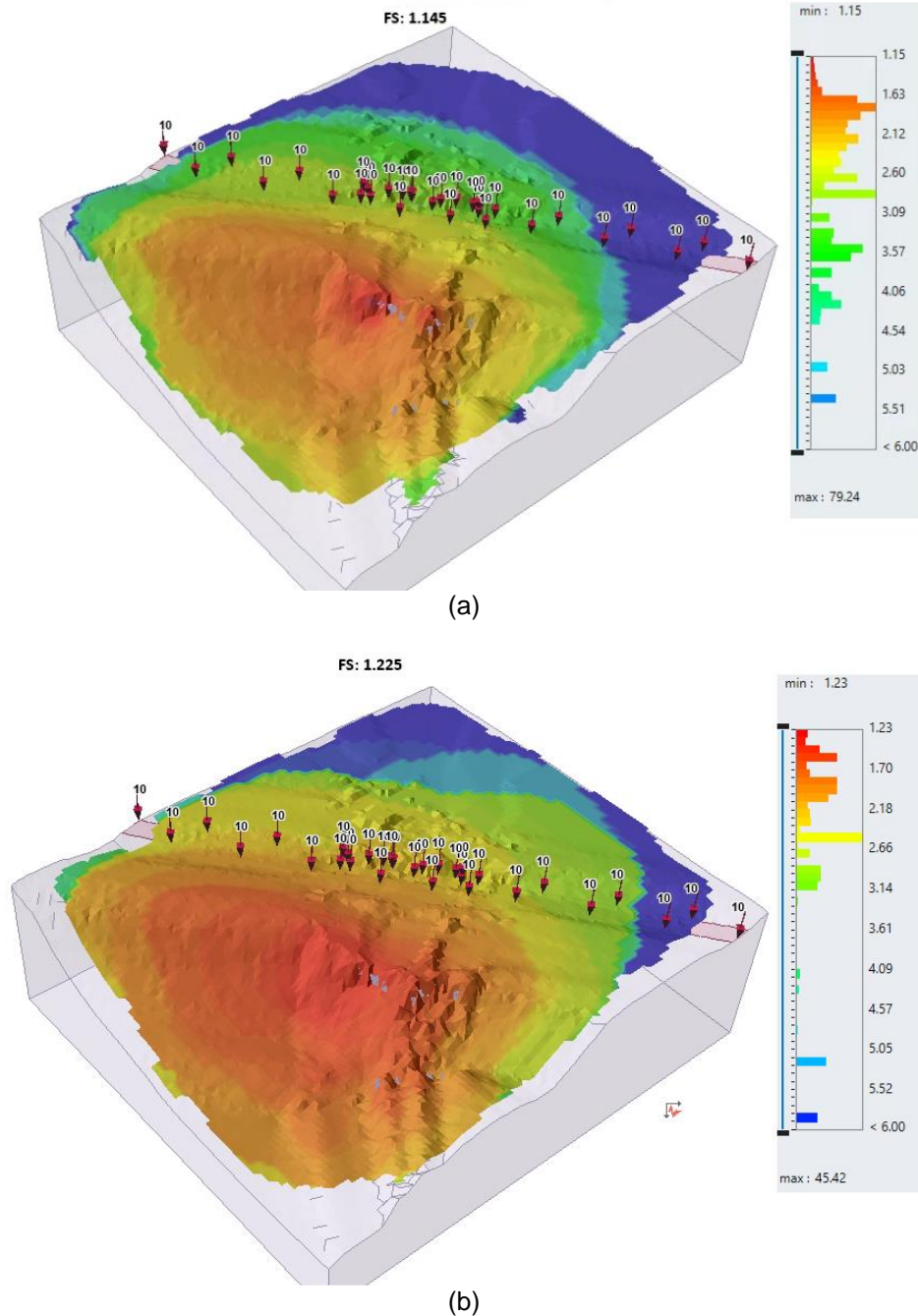


Figura 24. Factores de seguridad obtenidos con la metodología de Janbu en el software SLIDE3 de la sección 3 para las condiciones (a) estática (b) pseudo-estática





Como se puede observar en los resultados obtenidos los factores de seguridad obtenidos, la sección 3 al presentar factores de seguridad de 1,0, se encuentra en estado de equilibrio límite. Sin embargo, para la superficie de falla crítica, que de igual manera que en los casos anteriores corresponde a las zonas cercanas a la corona del talud, no se cumple con lo recomendado en el CGTLCR. No obstante, esta superficie tal y como se puede observar en los mapas de superficies de falla, corresponde a un volumen pequeño y puntual de material inestable, que, de acuerdo con lo observado en el sitio, son bloques con pendientes verticales e incluso en algunas zonas con pendientes negativas (convexas). Esta condición hace que esas zonas se tornen inestables. El resto de las superficies de falla, de acuerdo con el histograma de factores de seguridad asociados tienen valores favorables.

Por lo tanto, para la sección 2 y 3 se concluye que las zonas inestables son volúmenes pequeños de material con pendientes desfavorables para la estabilidad y el resto del área analizada presenta factores de seguridad apropiados según lo recomendado en el CGTLCR.

Por su parte la sección 1, presenta la condición crítica, la cual presenta una zona en equilibrio límite para la condición estática, en el resto de las condiciones de análisis la sección no cumple con lo sugerido en el CGTLCR para el sitio de análisis.

#### IV. Comentarios finales

Teniendo en consideración los resultados mostrados en las secciones anteriores, es importante resaltar que este análisis no representa resultados definitivos ya que la información disponible y el estudio completo correspondiente, deben ser asignados a un profesional en geotecnia responsable de realizar un análisis exhaustivo, contando con resultados de una adecuada campaña de exploración geotécnica, para así poder contar con los insumos necesarios para emitir la propuestas de estabilización que pueden incluir diseño obras, en caso de que así se requiera. Sin embargo, este análisis constituye un insumo y una guía que puede ser tomada en consideración para llevar a cabo análisis más exhaustivos para evaluar las afectaciones que puede sufrir la estructura del puente sobre el río Virilla y el pavimento de la RN N°27.

Después de realizar el recorrido por los alrededores del km 17+065, es posible afirmar la presencia de una zona de posible inestabilidad, dados los agrietamientos observados en la superficie del terreno. El material deslizado está conformado por bloques de roca muy fracturados y una gran cantidad de suelo, dejando expuesta la matriz rocosa que conforma el terreno, sobre la cual se encuentra cimentado el puente sobre el río Virilla en RN N°27. Dada esta condición, el deslizamiento del 18 de setiembre del presente año no ocasionó cambios en el terreno circundante que tuvieran una afectación directa sobre la estructura del puente. Sin embargo, debido a los agrietamientos en el terreno, se considera que la zona del predio ubicado a aproximadamente 100 m de la estructura del puente se puede constituir como una zona inestable. Por tal motivo, se considera apropiado implementar monitoreos periódicos para que, en caso de ocurrir un movimiento del suelo, poder establecer medidas preventivas en la zona que se pueda ver afectada.

También se considera importante realizar análisis de esfuerzo-deformación en el bastión del puente y en el pavimento de la RN N°27 utilizando Métodos de Elemento Finito (MEF), incluyendo periodos de precipitación intensa y la posible interacción con sismos, para así estudiar el panorama completo de la zona ante eventos extremos que pudieran suceder eventualmente en algún momento.

Específicamente, a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones preliminares de la condición actual del sitio se concluye que, para la sección 1, la corona del talud conformada con pendientes prácticamente verticales se encuentra en condición de equilibrio límite para el caso estático ( $FS= 1,00$ ), es decir no ha fallado, pero no cumplen con los factores de seguridad recomendados en el CGTLCR



para la confirmación de taludes estables. Sin embargo, al aplicar una carga de sismo, estas zonas presentan inestabilidad.

Dadas las condiciones observadas en campo, es de esperar que una vez que las zonas cercanas a la corona del talud pierdan el volumen de material que se encuentra suelto e inestable, adopten una nueva pendiente que sea favorable para la estabilidad del talud, y con ello la RN N°27 pueda continuar operando de manera normal sin ver comprometida su funcionalidad ni seguridad. Sin embargo, no se debe omitir el constante monitoreo del sitio, así como análisis de estabilidad y deformación tomando en cuenta los eventos extremos mencionados y con resultados de la conformación del sitio con las respectivas propiedades de los materiales encontrados producto de una campaña de exploración geotécnica acorde con la dimensión de la condición del sitio.

## V. Referencias

1. Alvarado, M.E., 1982: Estudios sedimentológicos en la Formación Pacacua (Mioceno, Costa Rica). Tesis de Licenciatura, ECG-UCR, 185 pp.
2. 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.
3. Asociación de geotecnia (2009). Código de Cimentaciones de Costa Rica. Tecnológico de Costa Rica
4. Barquero, R., Boschini, I., Climent, A., Fernandez, M., Montero, W. & Rojas, W., 1991: La crisis sísmica del golfo de Nicoya y eventos sísmicos relacionados, Costa Rica, 1990. En: Informe técnico de Red Sismologica Nacional, RSN (ICE-UCR), 163pag.
5. Climent, A. & Bolaños, M., 1999: Mapa de espesores de materiales no consolidados en el Área Metropolitana de San José. Informe Interno ICE, 12 pp. + 4 mapas.
6. Bergoeing, J., & Malavassi, E., 1982: Geomorfología del Valle Central de Costa Rica. Depto de Geografía Univ de Costa Rica e I.G.N. San José.
7. Denyer, P. & Arias, O., 1991: Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 12:1-59.
8. Echandi, E., 1981: Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del río Virilla. - Tesis de Licenciatura, ECG-UCR, 123 pp.
9. Gans, P.B., Alvarado, G., Pérez, W., Mac Millan, I., & Calvert, A., 2003: Neogene Evolution of the Costa Rican Arc and Development of the Cordillera Central. Abstract, Geological Society of America, Cordillera Section, 99th Annual, April 2003.
10. Gans, P.B., Mac Millan, I., Alvarado, G., Pérez, W. & Sigrán, C., 2002: Neogene Evolution of the Costa Rican Arc. Abstract, Geological Society of America 2002 Annual Meeting, Denver, October 2002.
11. 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.



12. Hernández, J. & Vargas, A., 1992: Geología urbana del cantón de Escazú provincia de San José Costa Rica. -173 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
13. Hidalgo, P.J., Alvarado, G.E. & Linkimer, L., 2004: La lavina del Valle Central (Costa Rica): ¿lahar o debris avalanche? Revista Geológica de América Central, 30: 101-109.
14. Kussmaul, S., 1988: Compasión petrológica entre el piso volcánico del Valle Central y la Cordillera Central de Costa Rica. Ciencia y Tecnología 12(1-2):109-116.
15. 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.
16. Méndez, J. & Hidalgo, P.J., 2004: Descripción geológica del depósito de debris avalanche El Coyol, Formación Barva, Costa Rica. - Revista Geológica de América Central, 30: 41-58.
17. Peraldo, G., & Montero, W., 1999: Sismología Histórica de América Central. – 347 págs. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, México, Publ. No. 513.
18. 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.
19. 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
20. 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
21. Ruiz P, Mana S, Gazel E, Soto GJ, Carr M, Alvarado GE (Chapter 2) Geochemical and geochronological characterisation of the Poas stratovolcano stratigraphy. In: Tassi F, Mora-Amador R, Vaselli O (eds) Poás volcano (Costa Rica): the pulsing heart of Central America Volcanic Zone. Springer, Heidelberg (Germany).
22. Soto, D., Chaves, I., Duran, M., Herra, D., 2012: Susceptibilidad de deslizamiento del cantón de Escazú y análisis a detalle de cinco casos específicos: Palo Campana, Salitrillo, Curio y la Cuenca de los Ríos Agres y Guayabos. 130 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic]
23. Zamora, R.A., 2005: Evaluación conjunta de amenazas naturales para la infraestructura civil y vial de las principales poblaciones del sur de San José. - 189 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].