



Vigilada Mineducación

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ESTABILIDAD DEL TERRENO A PARTIR DE
MÉTODOS DETERMINÍSTICOS EN LA CABECERA MUNICIPAL DE ARMENIA,
ANTIOQUIA**

Comparative analysis of terrain stability through deterministic models in the urban area of Armenia,
Antioquia

JOEL DAVID CAMPO CORREA

Proyecto de grado

Asesor:

Marco Fidel Gamboa Ramirez

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2022

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	8
3.	HIPÓTESIS.....	8
4.	OBJETIVOS	8
5.	METODOLOGÍA	9
5.1	BASE DE DATOS Y PARAMETROS DE ENTRADA	10
6.	SGC (2015).....	14
6.1	MARCO TEÓRICO.....	14
6.2	RESULTADOS.....	15
7.	TRIGRS.....	16
7.1	MARCO TEÓRICO.....	16
7.2	RESULTADOS.....	17
8.	SCOOPS3D.....	19
8.1	MARCO TEÓRICO.....	19
8.2	RESULTADOS.....	21
9.	DISCUSIÓN	22
10.	CONCLUSIONES	28
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	31
12.	ANEXOS.....	37

Lista de figuras

Figura 1. A) Mapa de localización de la zona de estudio (ZE). B) Localización regional de la ZE. C) Modelo de elevación digital (DEM) de la ZE.	6
Figura 2. Flujograma metodológico del proyecto.	9
Figura 3. Parámetros de entrada usados en cada modelo para las diferentes unidades geológicas y escenarios analizados. Para mayor detalle diríjase al Anexo 3A-J	13
Figura 4. Mapa de factores de seguridad obtenidos por medio del SGC (2015). (A) Condición actual. (B) Condición saturada. El círculo verde muestra la ubicación del FS mínimo.	15
Figura 5. Mapa de factores de seguridad obtenidos por medio de TRIGRS. (A) Condición actual. (B) Condición saturada. El círculo verde muestra la localización del FS mínimo.....	18
Figura 6. Mapa de factores de seguridad obtenidos por medio de Scoops3D. (A) Condición actual. (B) Condición saturada. El círculo verde muestra la ubicación del FS mínimo.	21
Figura 7. Desempeño de los diferentes escenarios y métodos evaluados a través del Índice de Éxito (SI) y el Índice de Error (EI). El área verde indica predicciones exitosas ($SI/EI > 1$), mientras que el área gris indica predicciones pobres ($SI/EI < 1$). Tomado y adaptado de Song et al., (2020).	27

Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros de entrada requeridos para cada método determinístico.	11
Tabla 2. Análisis comparativo entre los resultados de cada método por escenario analizado con base en los índices definidos por Sorbino et al. (2010).....	23

RESUMEN

Los deslizamientos son fenómenos que nos afectan frecuentemente debido a lluvias en zonas altamente susceptibles y muy pobladas como los andes colombianos. Por esta razón, es imperioso zonificar la amenaza por movimientos en masa en la planificación territorial del país. En ese sentido, los métodos determinísticos al considerar las propiedades físicas del terreno que controlan los deslizamientos son de gran utilidad, especialmente los análisis en 1D y 3D ya que permiten zonificar la amenaza por movimientos en masa de manera objetiva, mediante el factor de seguridad a lo largo de zonas extensas. En Antioquia, uno de los departamentos de los andes colombianos más afectado por estos fenómenos, han sido implementado métodos determinísticos como SGC (2015), TRIGRS y Scoops3D obteniendo buenos resultados. Sin embargo, nunca se han comparado entre ellos. El presente estudio busca evaluar y comparar la estabilidad del terreno en la cabecera municipal de Armenia, Antioquia mediante los métodos anteriormente mencionados. Para esto, a partir de información secundaria se construyó una base de datos con los parámetros de entrada necesarios en cada método. El análisis comparativo de los resultados se llevó a cabo mediante el índice de éxito (SI) y el índice de error (EI). Como resultados del proyecto, se encontró que los métodos 1D categorizan la amenaza detalladamente de acuerdo con la pendiente. Las relaciones SI/EI entre los métodos fueron similares, por lo que, si no se tiene la forma de estimar los parámetros de entrada para TRIGRS y Scoops3D, resulta mejor ejecutar SGC (2015).

Palabras claves: *amenaza, movimientos en masa, factor de seguridad, métodos determinístico, equilibrio limite.*

1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa detonados por lluvia son muy frecuentes a nivel mundial en terrenos montañosos y ambientes tropicales. En Suramérica, Colombia es el segundo país que reporta mayor cantidad de deslizamientos y fatalidades asociadas (Kirschbaum et al., 2015), siendo Antioquia el departamento que cuenta con mayor número de registros por este fenómeno (UNGRD, 2020). Una de las principales razones de estas cifras, se debe a que al menos un 80% de la población nacional se encuentra altamente expuesta a este tipo de amenaza, ya que está localizada sobre sectores de los andes colombianos con condiciones geológicas, topográficas y estructurales complejas (UNGRD, 2020, 2021). Por eso es fundamental zonificar la amenaza por movimientos en masa en la planificación territorial de los andes colombianos, a través de análisis de estabilidad detallados que incluyan la definición de escenarios de amenaza actuales y potenciales, en zonas urbanas como la cabecera municipal de Armenia localizada sobre el flanco occidental de la Cordillera Central, en la subregión del occidente antioqueño (EOT, 1999; CMGRD, 2015) (Figura 1). Para ello, las curvas IDF (intensidad-duración-frecuencia) permiten relacionar la intensidad y duración de las tormentas para diferentes periodos de retorno (SGC, 2015), que pueden ser usados en métodos determinísticos para evaluar la estabilidad de un terreno, teniendo en cuenta las propiedades físicas y geotécnicas del suelo que controlan los procesos morfodinámicos (Shano et al., 2020; He et al., 2021).

En estos análisis determinísticos, la amenaza por deslizamientos es determinada a partir del factor de seguridad, calculado en modelos de estabilidad de taludes en una, dos o tres dimensiones (Van Westen, 2004). Sin embargo, si se pretende zonificar la amenaza por movimientos en masa a través de métodos determinísticos 2D para un área más extensa que un talud en particular, deben interpolarse los valores de factor de seguridad en cada perfil de estabilidad con base en su distribución espacial, ya sea mediante la experiencia personal en campo, por métodos geoestadísticos como kriging, IDW, etc. (Luo et al., 2009) o definiendo unidades morfodinámicas independientes (Gu et al., 2015). Lo cual es una desventaja frente a modelos determinísticos 1D y 3D, que logran representar en cada píxel un factor de seguridad por medio de información determinística precisa. Por lo tanto, se necesitan implementar modelos determinísticos 1D y 3D que permitan zonificar la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia, de manera objetiva a escala de cabecera

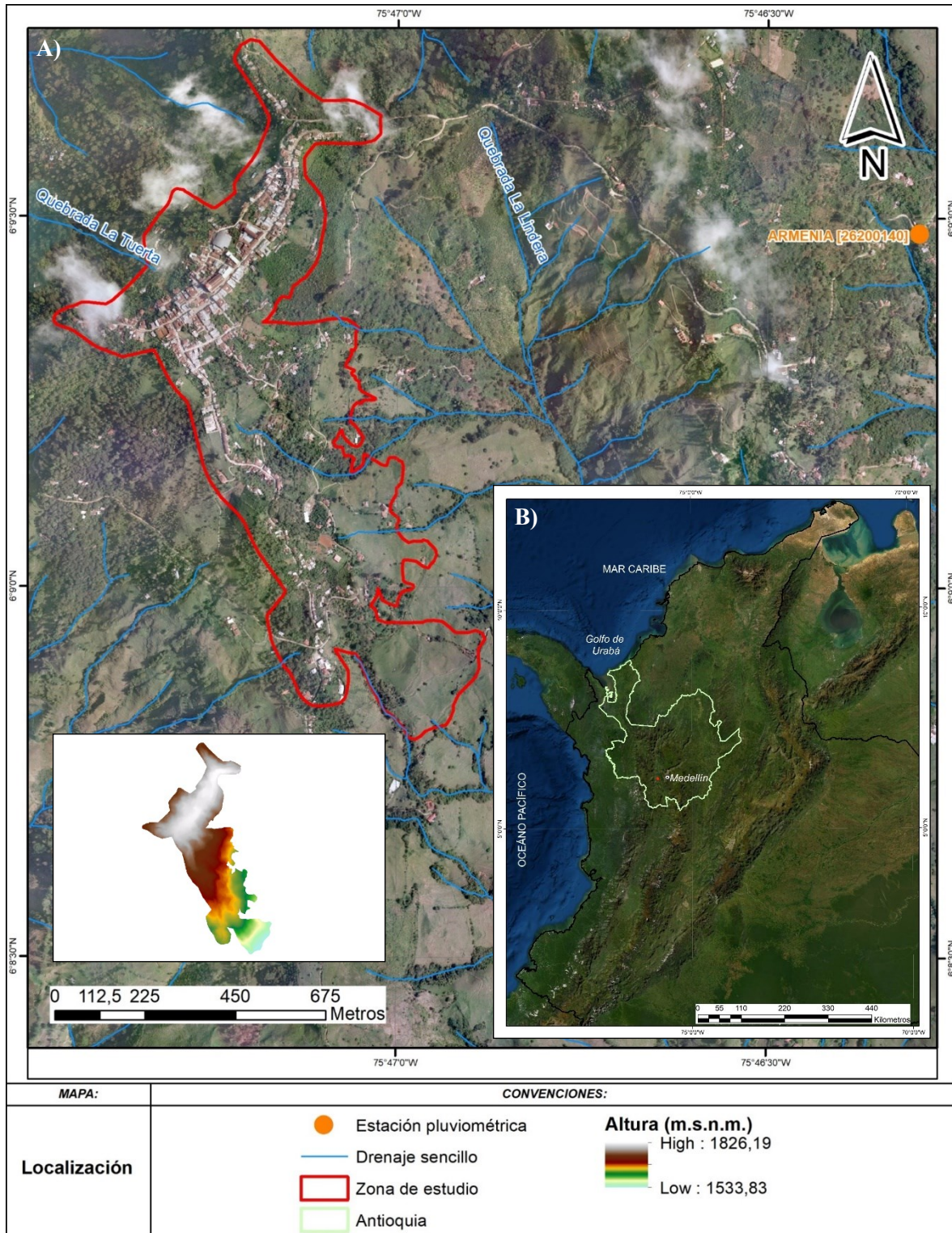


Figura 1. A) Mapa de localización de la zona de estudio (ZE). B) Localización regional de la ZE. C) Modelo de elevación digital (DEM) de la ZE.

municipal. Actualmente, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) propone implementar un método determinístico 1D, donde se determina el nivel freático en función de un periodo

de retorno, para aplicar la ecuación del factor de seguridad de talud infinito en cada una de las celdas del terreno (SGC, 2015). Este método ya ha sido usado en una especialización en prevención, atención y reducción de desastres en la Universidad Católica de Manizales (Fajardo Fonseca, 2019) y en estudios básicos de amenaza (EBA) en los municipios de Jericó, Montebello, Caramanta y Armenia Mantequilla (EAFIT, 2019; Corplanes, 2019, 2021, 2022).

Alrededor del mundo han sido ampliamente usados en diferentes países otros modelos determinísticos. En los de una dimensión, resalta TRIGRS (Baum et al., 2008) como el modelo físico más comúnmente usado en análisis de estabilidad en la última década (Meena et al., 2022). Este combina un modelo de infiltración de lluvia transitoria, a partir del cual determina la presión de poros en el suelo a lo largo de una tormenta, con un modelo de estabilidad de talud infinito para determinar espacio-temporalmente el factor de seguridad. En Colombia, específicamente en Antioquia, ha sido implementado en la cuenca La Liboriana y la cuenca La Arenosa (Marin et al., 2021a, 2021b, 2021c), en análisis de sensibilidad (Osorio Ríos et al., 2022), estudios de confiabilidad para la evaluación de movimientos en masa (García Aristizábal et al., 2019) y analizando el efecto de la lluvia en la amenaza por movimientos en masa asociada al cambio climático (Aristizábal Giraldo et al., 2022).

Entre los modelos determinísticos 3D, sobresale el modelo de Scoops3D (Reid et al., 2015) por calcular el factor de seguridad para muchas superficies potenciales de falla a diferentes profundidades en el terreno, a partir del análisis convencional de equilibrio límite en 3D usando el método de “columnas” (Reid et al., 2015), constituidas por suelo e interconectadas entre si (Reid et al., 2000; Palazzolo et al., 2021). Scoops3D lo destacan como una gran herramienta para evaluar la amenaza por deslizamientos espacio-temporalmente distribuidos, cuando se complementa con las presiones de poros calculadas en el modelo de TRIGRS (Tran et al., 2018; He et al., 2021; Palazzolo et al., 2021). En Colombia, Antioquia se ha usado en estudios de amenaza a cargo del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (ÁREA & UNAL, 2018), en el EBA de Armenia Mantequilla (Corplanes, 2022) y en diferentes proyectos de grados realizados en la Universidad EAFIT y la Universidad Nacional de Colombia (Jaramillo González, 2019; Luján Rivas, 2019).

A pesar de que en Antioquia ya se han implementado los métodos determinísticos anteriormente mencionados, nunca se han comparado sus resultados. Por lo que desde el punto de vista práctico es difícil determinar cuál podría ser más adecuado. Con el desarrollo de este proyecto se busca evaluar y comparar la estabilidad del terreno, a la luz de la distribución espacial del factor de seguridad sobre la cabecera municipal de Armenia Mantequilla, obtenida mediante los métodos determinísticos del SGC (2015), Scoops3D y TRIGRS para las condiciones actuales y saturadas del terreno, con el fin de determinar el método y el escenario más adecuado para zonificar la amenaza por deslizamientos detonados por lluvia.

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Entre los métodos determinísticos SGC (2015), TRIGRS y Scoops3D, ¿Cuál sería más exacto para representar la amenaza por movimientos en masa en Armenia, Antioquia?

3. HIPÓTESIS

Dado el enfoque tridimensional de Scoops3D, se plantea que se obtendrían resultados más exactos que TRIGRS y SGC (2015).

4. OBJETIVOS

Objetivo general: Evaluar y comparar la estabilidad del terreno a partir de métodos determinísticos del SGC (2015), TRIGRS y Scoops3D sobre la cabecera municipal de Armenia Mantequilla para el escenario actual y saturado del terreno, con el fin de determinar el escenario y el método más adecuado para representar la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia.

Objetivos específicos:

- Conformar la GDB y los parámetros de entrada para el análisis de la estabilidad del terreno a partir de los métodos determinísticos.
- Evaluar la estabilidad de la zona de estudio por el método de SGC (2015) para el escenario actual y saturado.
- Evaluar la estabilidad de la zona de estudio por el método de TRIGRS para el escenario actual y saturado.

- Evaluar la estabilidad de la zona de estudio por el método de Scoops3D para el escenario actual y saturado.

5. METODOLOGÍA

Este proyecto fue desarrollado de la siguiente manera (Figura 2):

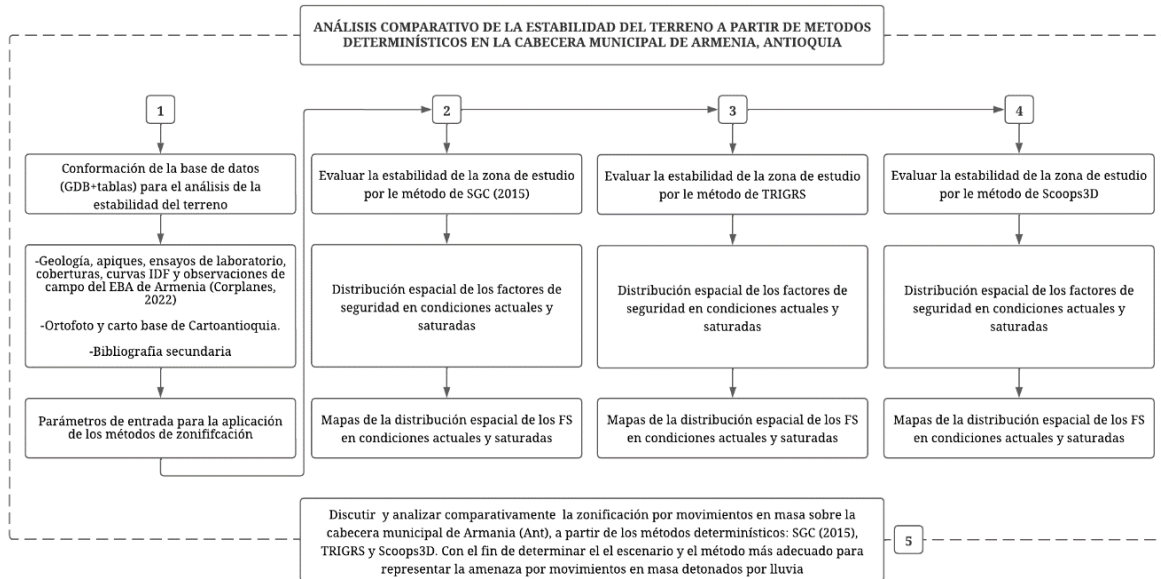


Figura 2. Flujograma metodológico del proyecto.

En primer lugar, se conformó una base de datos con tablas y GDB que permitieron determinar los parámetros de entrada necesarios para la aplicación de los métodos determinísticos. Seguido se evaluó la estabilidad del terreno en SGC (2015), luego en TRIGRS y finalmente en Scoops3D, teniendo en cuenta la clasificación de amenaza por deslizamientos a partir del factor de seguridad (FS) propuesto en este proyecto (**Anexo I**), y los dos posibles escenarios de amenaza por deslizamientos detonados por lluvia: el escenario actual asociado a un evento de lluvia con un periodo de retorno (Tr) de 25 años bajo las condiciones actuales del terreno, y el segundo, el escenario saturado relacionado con lluvias extremas donde la profundidad del nivel freático es igual al espesor de la columna del suelo. Dicho tiempo de retorno se escogió con base en las curvas IDF disponibles en Corplanes (2022) y en SGC (2015), donde sugieren utilizar un periodo de retorno de 20 años. Posteriormente se generaron mapas de la distribución del FS para los escenarios evaluados en cada método. En esta etapa, se observó que las categorías de amenaza estaban correlacionadas con la pendiente. Por ende, en Rstudio se graficaron y se

analizaron estos datos a través de la prueba de correlación de rango no paramétrica de Spearman, la cual indica que existe una relación monótonica (no necesariamente lineal) entre las variables (Puth et al., 2015), y puede ser aplicada cuando estas tienen distribución no normal ya que no se ve demasiado afectada por *outliers* (Mohr et al., 2022).

Por último, fue realizado el análisis comparativo entre los resultados de la estabilidad del terreno obtenido anteriormente en cada método. Aquí, la eficiencia de cada modelo para predecir movimientos en masa fue discutida por medio de dos índices propuestos por Sorbino et al., (2010): índice de éxito (SI) e índice de error (EI) (**Anexo 2**). SI indica el porcentaje de área considerada por el modelo inestable (A_{in}) que coincide con zonas detonadas en deslizamientos reales (A_{uns}). Por lo tanto, a mayor SI, mejor capacidad para predecir deslizamientos (Ecuación 1). EI representa el porcentaje de área inestable definida por el modelo que está por fuera de los deslizamientos reales (A_{out}), en comparación al área del terreno que no está afectado por deslizamientos (A_{stable}), indicando que, a menor EI, mayor eficiencia del modelo ya que se sobreestiman menos áreas inestables (Ecuación 2).

$$\text{Ecuación 1. } SI = \frac{A_{in}}{A_{uns}} * 100$$

$$\text{Ecuación 2. } EI = \frac{A_{out}}{A_{stable}} * 100$$

Se escogieron estos índices porque consideran tanto la capacidad del modelo para predecir movimientos en masa (SI) como su rendimiento para no sobrestimar áreas inestables (EI). En ese sentido, el método y el escenario con mejor desempeño para zonificar la amenaza por movimientos en masa es el de mayor relación SI/EI. Además, ya que se cuenta con los escarpes de procesos morfodinámicos cartografiados en el EBA de Armenia (Corplanes, 2022) en formato *shapefile*, los cuales fueron usados como zonas fuentes de desprendimiento de material para comprobar y calibrar cada modelo mediante el SI y el EI.

5.1 BASE DE DATOS Y PARAMETROS DE ENTRADA

En la construcción de la base de datos se utilizó geología, apiques, ensayos de laboratorio, coberturas, procesos morfodinámicos, curvas IDF y observaciones de campo del EBA de Armenia (Corplanes, 2022), ortofoto (año 2011) y cartografía base 1:2000-1:10000 de Cartoantioquia e información secundaria de la bibliografía, para determinar los parámetros de entrada requeridos en cada método (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de entrada requeridos para cada método determinístico.

Parámetros	TRIGRS	Scoops3D	SGC (2015)
Cohesión (c')	✓	✓	✓
Angulo de fricción (ϕ')	✓	✓	✓
Peso unitario (γ)	✓	✓	✓
Nivel freático	✓	✓	✓
DEM	✓	✓	
Pendiente	✓		✓
Espesor del suelo	✓	✓	✓
Usos del suelo y coberturas			✓
Conductividad hidráulica saturada (K_s)	✓		
Difusividad hidráulica del suelo (D)	✓		
Contenido volumétrico de agua saturada (θ_s)	✓		
Contenido volumétrico de agua residual (θ_r)	✓		
Alpha (α), un parámetro que representa la inversa de la presión ejercida por la entrada del aire en el suelo	✓		
Tasa de infiltración inicial (I_z)	✓		
Intensidad y duración de precipitación	✓		

Los parámetros mecánicos (c' , ϕ' , γ) fueron tomados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras de suelo extraídas de los 4 apiques, de 1-2 m de profundidad, distribuidos en la zona de estudio (**Anexo 3A**). El nivel freático actual fue inferido a partir de la profundidad máxima alcanzada en los apiques y las observaciones de campo realizadas en Corplanes (2022). El modelo de elevación digital del terreno (DEM) se construyó en ArcMap con resolución de 2m a partir de las curvas de nivel 1:2000 y 1:10000 de Cartoantioquia. Las curvas de menor resolución se usaron para complementar las zonas sin información disponible. Las pendientes se obtuvieron del DEM mediante la herramienta *slope* en ArcMap. El espesor del suelo fue extraído y definido de Corplanes (2022) a través de los apiques y observaciones en campo de los afloramientos expuestos. Los usos del suelo se establecieron ajustando las coberturas levantadas en Corplanes (2022) con la ortofoto de Cartoantioquia. Los parámetros hidráulicos fueron seleccionados a partir de los ensayos de laboratorio y la bibliografía disponible: K_s fue determinada con base en la clasificación del suelo USC para cada unidad geológica y sus respectivos valores típicos en Carter & Bentley (1991), Bell (2009) y Budhu (2015). Los parámetros de la curva de retención de agua en el suelo (θ_s , θ_r , α) se escogieron de los valores promedios reportados

por Hodnett & Tomasella (2002) para suelos tropicales, teniendo en cuenta la clasificación textural del suelo USDA para las unidades geológicas presentes. I_z y D se calcularon siguiendo ecuaciones empíricas empleadas por autores como do Pinho & Augusto Filho (2022); Tran et al., (2018); Park et al., (2013), donde $I_z = K_s * 0.01$ y $D = K_s * 100$. La intensidad y duración del evento de lluvia asociado a un periodo de retorno de 25 años se estableció por medio de la curva IDF de la estación pluviométrica Armenia (Figura 1A). En el **Anexo 3B** se muestran en diagramas de barras los 6 periodos con su respectiva intensidad y duración, para un total de 169.5 mm acumulados en 4 horas.

En la Figura 3 se muestran los parámetros de entrada utilizados por cada método para evaluar la estabilidad del terreno. Con base en ellos (**Anexo 3A-J**), la zona de estudio se describe como un filo de montaña de tope amplio y altura promedio de 1800 m.s.n.m., que marca la línea divisoria de aguas de las quebradas La Lindera y La Tuerta. Esta tiene una precipitación media multianual de 1910.75 mm/año (Corplanes, 2022), no presenta influencia directa de un sistema de fallas ni de cauces importantes, aunque en sus laderas nacen algunos drenajes afluentes de las quebradas anteriormente mencionadas (EOT, 1999). La fisiografía cercana sobre la cual se asienta el casco urbano corresponde a una topografía de alta pendiente (CMGRD, 2015), con laderas principalmente abruptas (40%-60%), muy inclinadas (25%-40%) e inclinadas (10%-25%), asociadas predominantemente a suelos del perfil de meteorización de los esquistos del grupo Ayurá-Montebello (Mejía, 1984), llenos antrópicos en las zonas de menor pendiente relacionados al desarrollo urbanístico y depósito de vertiente asociado a la morfodinámica activa de las laderas (Corplanes, 2022).

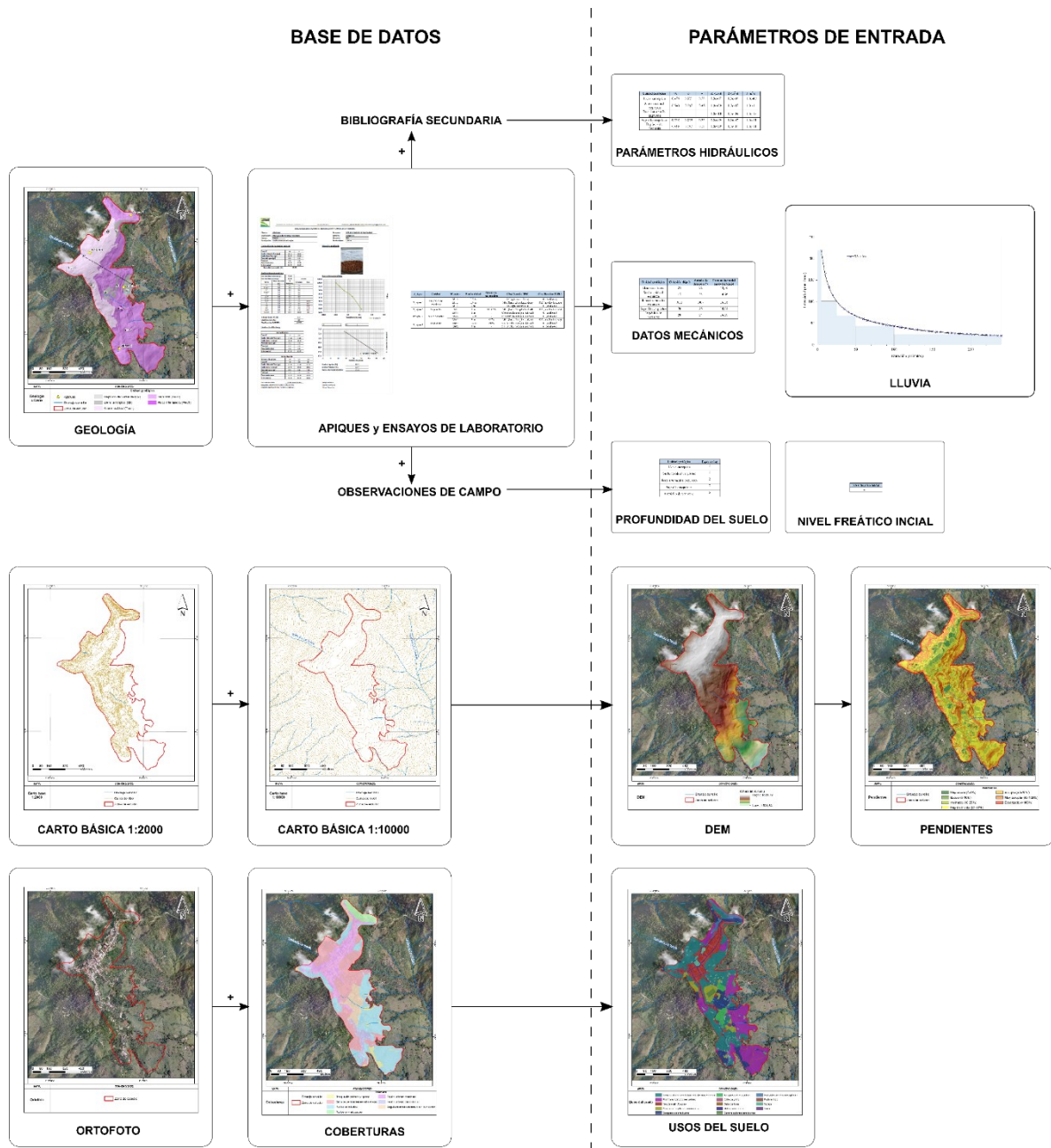


Figura 3. Parámetros de entrada usados en cada modelo para las diferentes unidades geológicas y escenarios analizados. Para mayor detalle diríjase al **Anexo 3A-J**.

En el perfil de meteorización se identificaron dos horizontes: suelo residual (*Grado VI*) caracterizado por presentar una matriz arcillosa plástica, de muy baja permeabilidad con variaciones composicionales entre esquistos grafitoso y esquistos micáceo; saprolito (*Grado IV y V*), dentro del cual se observa aflorando una roca de esquistos (*Pev 3*) que conserva las propiedades mecánicas más competentes en la zona de estudio. Este nivel se caracteriza por

conservar la estructura de foliación y tener textura arcillo-limosa de baja permeabilidad. Los llenos antrópicos son depósitos artificiales de composición heterogénea embebida en una matriz. El depósito de vertiente corresponde a un evento de flujo de lodos y escombros matriz-soportado (70/30). Sus bloques corresponden a rocas metamórficas subangulares con diferentes grados de meteorización, embebidas en una matriz arcillo-limosa de baja permeabilidad (Corplanes, 2022). Por otra parte, el suelo es desarrollado principalmente por cultivos, seguido de pastizales en condiciones pobres debido al sobrepastoreo y finalmente por el desarrollo urbanístico (residencial, comercial, calles, etc.) que impermeabiliza el terreno. Además, el nivel freático es muy somero (**Anexo 3G**). Por lo tanto, esta una zona es muy interesante para trabajar desde el punto de vista de la gestión del riesgo por movimientos en masa.

6. SGC (2015)

6.1 MARCO TEÓRICO

Este modelo implementa la ecuación de factor de seguridad (FS) para el método de talud infinito en cada una de las celdas del DEM (SGC, 2015). En el talud infinito se compara las fuerzas resistentes (R) y desestabilizadoras (D) en un plano paralelo a la superficie del suelo (Michel et al., 2014), asumiendo una pendiente y una superficie de deslizamiento infinita y paralela a la superficie del terreno (**Anexo 4**), sin considerar las fuerzas adyacentes (Raia et al., 2014). La ecuación de FS se expresa de la siguiente manera (Ecuación 3):

$$\text{Ecuación 3. } FS = \frac{R}{D} = \frac{(c' b \sec \alpha + (\gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha) \tan \phi')}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha}$$

Vea **Anexo 4** para la definición de símbolos. En la Ecuación 3, la disminución en el FS se da cuando la altura de la lámina del agua (h_w) aumenta, disminuyendo los esfuerzos efectivos en el suelo. Este ascenso del nivel freático está asociado con la variabilidad de la lluvia acumulada para largos periodos. En ese contexto, SGC (2015) propone calcular la profundidad del nivel freático asociado a un periodo de retorno para el cual se considera ocurrirá la falla, sugiriendo uno de 20 años, mediante la Ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4. } P_{f20} = (P_f - 1.65 CV P_f) - (I_{i20} * 24)$$

En el **Anexo 4** se explica cada termino y el método implementado para determinar las variables de la Ecuación 4. En el **Anexo 5** se presenta el procedimiento llevado a cabo en ArcMap para implementar la Ecuación 3.

6.2 RESULTADOS

En la Figura 4 se presentan los mapas de factor de seguridad (FS) obtenidos a través del método determinístico del SGC (2015) para los dos escenarios analizados, teniendo en cuenta las categorías de amenazas propuestas en este trabajo (**Anexo 1**).

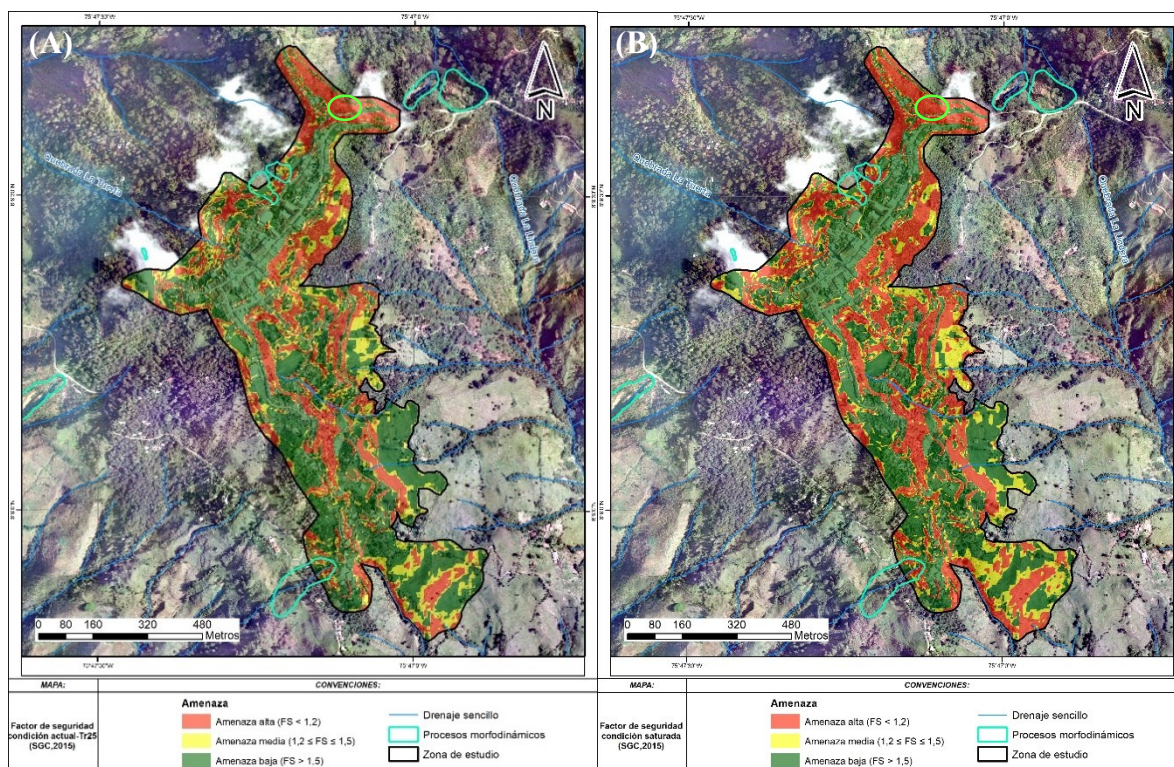


Figura 4. Mapa de factores de seguridad obtenidos por medio del SGC (2015). (A) Condición actual. (B) Condición saturada. El círculo verde muestra la ubicación del FS mínimo.

Para la **condición actual**, el valor mínimo de FS obtenido fue de 0.604, hacia la salida norte del casco urbano. La categoría de amenaza alta ocupa 16.65 ha, representando el 27.38% de la cabecera municipal. Por su parte, la categoría de amenaza media es la de menor proporción, representa 10.41 ha lo que equivale al 17.12% de la zona de estudio. Por último, la categoría de amenaza baja corresponde a la condición de mayor extensión, con 55.50% (33.75 ha) a lo largo del núcleo central de viviendas y algunos sectores puntuales de baja pendiente.

En la **condición saturada**, con un FS de 0.587, la zona de mayor inestabilidad también se localizó al norte del casco urbano. Sin embargo, el área en amenaza alta es de 22.39 ha lo que representa el 36.8% de la cabecera municipal. En menor cantidad se encuentra la categoría de amenaza media, con solo 10.33 ha lo que equivale al 17% de la zona de estudio. Finalmente, el 46.2% del área total (28.08 ha) clasifica en condición estable.

Para los dos escenarios evaluados, la distribución de los valores de factor de seguridad está estrechamente relacionada con la pendiente, el valor $P < 2.2e^{-16}$ el coeficiente de correlación de Spearman (r_s) = -0.97 y -0.98, para el caso actual y saturado respectivamente, confirman una correlación negativa (inversamente proporcional) muy fuerte entre las dos variables (**Anexo 6A** y **Anexo 7A**). Teniendo en cuenta la clasificación de las pendientes definida en Corplanes (2022) (**Anexo 8**), la categoría de amenaza alta se distribuye principalmente en laderas con pendientes escarpadas (>100%), muy abruptas (60-100%), abruptas (40-60%) y muy inclinadas (25-40%). Por otro lado, la categoría de amenaza media se concentra en pendientes inclinadas (10-25%) y muy inclinadas (25-40%). Finalmente, la categoría de amenaza baja está relacionada especialmente con pendientes muy suaves (0-3%), suaves (3-10%) e inclinadas (10-25%). Aunque se presenta un grupo de datos atípicos en pendientes muy inclinadas y abruptas (**Anexo 6B** y **Anexo 7B**), litológicamente están asociados con la roca intermedia de esquisto, la cual presenta propiedades mecánicas buenas frente a deslizamientos, y a llenos antrópicos que, pese a sus características mecánicas pobres, la potencia de esta unidad no es suficiente como para generar una condición de inestabilidad (sin considerar cargas externas).

7. TRIGRS

7.1 MARCO TEÓRICO

TRIGRS es un programa que combina el método de estabilidad de talud infinito (Taylor, 1948) con un modelo de infiltración vertical de agua en el suelo y flujo transitorio, a partir del cual calcula la presión de poros en el tiempo, para predecir espacial y temporalmente el factor de seguridad (FS) (Baum et al., 2008). Las hipótesis que asume el talud infinito son las mismas descritas en el MARCO TEÓRICO de SGC (2015), aunque se presentan algunas diferencias como la mencionada anteriormente sobre el modelo de infiltración, no considera

el efecto sísmico y permite calcular el FS a diferentes profundidades del terreno mediante la Ecuación 5.

$$\text{Ecuación 5. } FS(Z,t) = \frac{R}{D} = \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} + \frac{c' - \psi(Z,t) \gamma_w \tan \phi'}{\gamma Z \sin \alpha \cos \alpha}$$

La definición de los símbolos en la Ecuación 5 son los mismos establecidos en SGC (2015), pero $\psi(Z,t)$ es la cabeza de presión de agua subterránea en función de la posición vertical (Z) y del tiempo (t), determinada a partir del modelo de infiltración seleccionado por el usuario, el cual puede ser para condiciones iniciales saturadas o no saturadas con límite basal a una profundidad finita o infinita. Puesto que las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas en la zona de estudio son verticalmente uniformes (**Anexo 3F**), y que en los primeros dos metros de profundidad del terreno se tienen grados de saturación entre 80%-95% (**Anexo 3C**), en este estudio se eligió el modelo de infiltración saturado con límite basal infinito (**Anexo 9**). En ese sentido, Baum et al. (2008) propone una extensión a la solución lineal de la ecuación de Richard realizada por Iverson (2000), para predecir $\psi(Z,t)$ en función de dos componentes: uno inicial y otro transitorio. Si inicialmente el nivel freático está por debajo de la superficie del terreno, TRIGRS permite que el agua infiltre hasta que el nivel freático alcance la superficie. Este proceso se lleva a cabo sumando el componente transitorio a las cabezas de presión en las condiciones iniciales del terreno. Las ecuaciones que describen este proceso están en Baum et al. (2008). En el **Anexo 10** se presenta el procedimiento para calcular la distribución del FS en TRIGRS.

7.2 RESULTADOS

La distribución del factor de seguridad resultado del método determinístico de TRIGRS para los dos escenarios analizados se expone en la Figura 5.

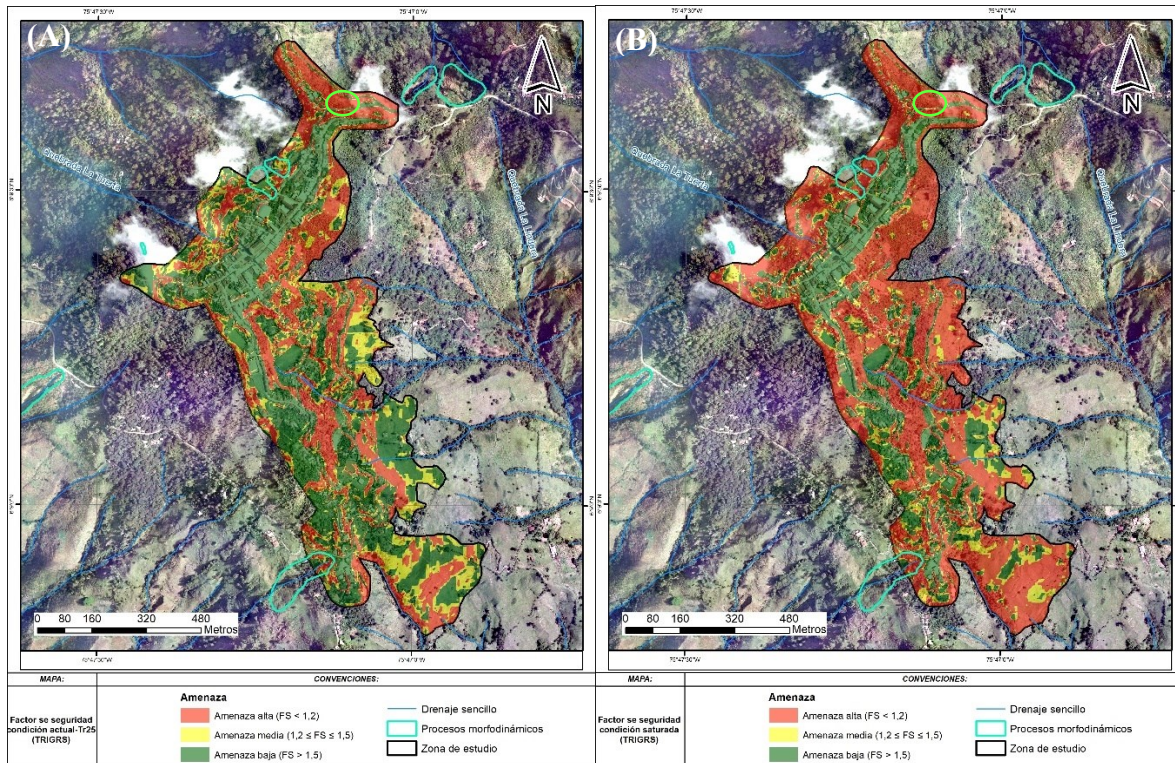


Figura 5. Mapa de factores de seguridad obtenidos por medio de TRIGRS. (A) Condición actual. (B) Condición saturada. El círculo verde muestra la localización del FS mínimo.

En relación con la **condición actual**, el factor de seguridad (FS) mínimo fue de 0.5643 hacia la salida del casco urbano (sector norte). Aunque generalmente la profundidad del FS mínimo para cada celda corresponde al espesor del suelo, de acuerdo con el análisis de los resultados, se determinó que en las zonas de amenaza alta a partir 3-4 metros de profundidad del suelo la estabilidad del terreno es baja ($FS < 1.2$) (**Anexo 11**). En este caso, la categoría de amenaza alta ocupa 19.66 ha lo que representa el 32.3% de la cabecera municipal. Por otro lado, la categoría de amenaza media es la de menor proporción con 10.39 ha lo que equivale al 17.1% de la zona de estudio. Por último, la categoría de amenaza baja ocupando el 50.7% del suelo urbano de Armenia corresponde a la condición de mayor extensión, concentrándose a lo largo del asentamiento urbano.

Durante la tormenta simulada en TRIGRS, la escorrentía (*run off*) generada en la zona de estudio fue mayor en comparación a la infiltración del agua en el suelo. Según el balance masas ($Precipitación + Exfiltración = Infiltración + Runoff$) para cada periodo de lluvia, en promedio el 99% de la precipitación se convirtió escorrentía (**Anexo 12A**). Además, esta va

disminuyendo a medida que la intensidad de la precipitación baja, y tiende a acumularse en zonas donde se forman drenajes de las quebradas La Lindera y La Tuerta (**Anexo 12B**).

Con referencia a la **condición saturada**, se registra el factor de seguridad mínimo más bajo de los métodos y escenarios evaluados en este proyecto, tiene valor de 0.4845 y se localiza hacia el talud norte de ingreso de la cabecera. A diferencia del anterior escenario, la categoría de amenaza alta corresponde a la condición de mayor extensión, ocupa 34.67 ha lo que representa el 57% de la cabecera municipal. La categoría de amenaza media es la de menor proporción con 6.84 ha lo que equivale al 11.2% de la zona de estudio. Por último, la categoría de amenaza baja ocupa el 31.7%, equivalente a 19.30 ha del casco urbano.

Similarmente que los RESULTADOS de SGC (2015), los valores de FS obtenidos en TRIGRS para los dos escenarios están vinculados con la inclinación de la pendiente, el valor $P < 2.2e^{-16}$ para ambos casos, y el coeficiente de correlación de Spearman (r_s) = -0.97 para la condición saturada y -0.95 para la condición actual, evidencian una relación inversamente proporcional muy fuerte entre las dos variables (**Anexo 13A y Anexo 14A**). Nótese en el **Anexo 13B y Anexo 14B** que las categorías de amenaza tienen una distribución muy parecida a la del SGC (2015), puesto que la amenaza alta se localiza principalmente en laderas desde muy inclinadas a escarpadas. La categoría de amenaza media agrupa pendientes inclinadas y muy inclinadas, mientras que la categoría de amenaza baja está relacionada especialmente con pendientes desde muy suaves a inclinada.

8. SCOOPS3D

8.1 MARCO TEÓRICO

Scoops3D es un software donde se calcula el factor de seguridad (FS) para millones superficies potenciales de falla a diferentes profundidades en el terreno, a partir del análisis convencional de equilibrio límite de momentos en 3D usando el método de “columnas” Bishop simplificado o Fellenius (Reid et al., 2015). En este estudio fue empleado el método de Bishop simplificado ya que se ha demostrado a nivel mundial obtener resultados más precisos (Reid et al., 2015; Nhu et al., 2019), al considerar las fuerzas horizontales entre las columnas.

Durante la ejecución del programa, las superficies de prueba son determinadas a partir de la intersección de esferas (simuladas por el software) con el DEM (**Anexo 15**). Dichas esferas se construyen con base en una malla de nodos determinada por los parámetros de búsqueda ingresados por el usuario, como: extensión vertical y horizontal, espaciamiento de los nodos e incremento del radio de la esfera. Cada nodo corresponde a un centro de una esfera. Esta búsqueda finaliza para cada nodo cuando se alcanza el máximo tamaño (volumen o área) de las superficies de falla establecido por el usuario.

Entre las superficies potenciales de falla y la superficie del terreno se determina para cada píxel una columna activa que conforma la masa deslizante. En cada una de estas, se calcula el momento de la fuerza resistente (M_r) y el momento de la fuerza actuante (M_a) a lo largo de un eje de rotación en el centro de cada esfera, considerando la dirección promedio de deslizamiento y los efectos de la presión de poros, para calcular el factor de seguridad. En ese sentido, Reid et al., (2015) proponen diferentes ecuaciones para hallar el FS dada la condición de poros que establece el usuario. Para el escenario actual, el efecto del agua subterránea en la estabilidad del terreno fue ingresado por medio de un archivo 3D con la distribución de las cabezas de presión, generado en TRIGRS 2.1 (Alvioli & Baum, 2016). De este modo, aplicando el método de Bishop, el FS está dado por la Ecuación 6. Mientras que para el escenario saturado está dada por la Ecuación 7, ya que el nivel freático se ingresó como una superficie piezométrica.

$$\text{Ecuación 6. } FS = \frac{M_r}{M_a} = \frac{\sum R_{i,j} \left[c_{i,j} A_{h_{i,j}} + (W_{i,j} - u_{i,j}) A_{i,j} \right] \tan \phi_{i,j} / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} \left[R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{eq} e_{i,j} \right]}$$

$$\text{Ecuación 7. } FS = \frac{M_r}{M_a} = \frac{\sum R_{i,j} \left[c_{i,j} A_{h_{i,j}} + (W_{i,j} - z_{pz_{i,j}} \gamma_w) A_{i,j} \right] \tan \phi_{i,j} / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} \left[R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{eq} e_{i,j} \right]}$$

Vea **Anexo 15** para la definición de los símbolos de las ecuaciones anteriores. Es importante mencionar que en ambas ecuaciones, el momento de la resistencia al corte está en función del factor de seguridad (debido a $m_{\alpha_{i,j}}$). Por lo tanto, la solución se obtiene

mediante un proceso iterativo hasta que el FS converja a un solo valor. En el **Anexo 16** se presenta el procedimiento ejecutado para evaluar la estabilidad del terreno en Scoops3D.

8.2 RESULTADOS

Los mapas de factor de seguridad obtenidos por medio del método determinístico de Scoop3D para los dos escenarios evaluados se muestra en la Figura 6.

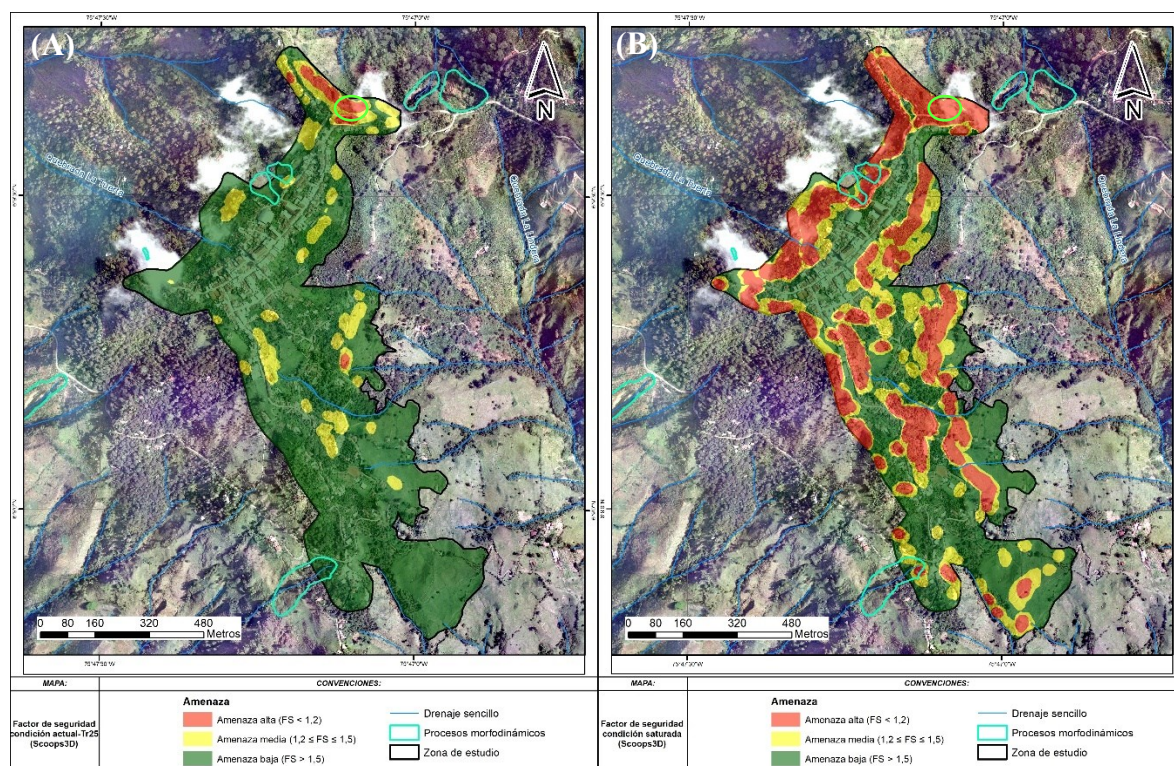


Figura 6. Mapa de factores de seguridad obtenidos por medio de Scoops3D. (A) Condición actual. (B) Condición saturada. El círculo verde muestra la ubicación del FS mínimo.

En cuanto a la **condición actual**, con un valor de 1.038 tiene el FS mínimo más alto de todos los métodos y escenarios analizados en este trabajo. Esto se ve directamente reflejado en la extensión de la categoría de amenaza baja, que con 53.62 ha representa el 88.18% de la zona de estudio. Mientras que la categoría de amenaza alta se encuentra muy reducida, con solo 1.76% distribuidos especialmente en el talud norte de la cabecera. Destacando que ninguno de los procesos morfodinámicos reales (cartografiados en Corplanes (2022)) es modelado en amenaza alta, resultando con un valor de cero el índice de éxito (SI). Finalmente, la categoría de amenaza media ocupa 6.12 ha lo que equivale a 10.08% de la

zona de estudio. Dado que la mayoría del área se encuentra en condición estable, no se encontró relación evidente con la pendiente.

Respecto a la **condición saturada**, la zona de mayor inestabilidad se encuentra hacia el norte de la cabecera, donde se determinó una superficie potencial de falla con una profundidad máxima de 9 m, una dirección promedio de deslizamiento a 013° , un FS de 0.5503 y un volumen estimado de 1907 m^3 (**Anexo 17**). La categoría de amenaza alta con 19.48 ha representa el 32.04% de la cabecera municipal. Por otro lado, la categoría de amenaza media representa la condición de menor proporción, ocupa 12.79 ha lo que equivale al 21.04% del área de estudio. Finalmente, la categoría de amenaza baja corresponde a la condición de mayor proporción del suelo urbano, con 28.53 ha (46.92%) en la parte central de la población y algunos sectores de baja pendiente hacia el sur y este del casco urbano.

Aunque la pendiente no es una variable que determine claramente la distribución de los valores de factor de seguridad para la condición saturada en Scoops3D, el coeficiente de correlación de Spearman (r_s) = -0.65 y el valor $P < 2.2e^{-16}$, indican que existe una correlación negativa moderada entre las dos variables (**Anexo 18A**). A pesar de que hay una tendencia general donde aumenta el factor de seguridad a medida que disminuye de la pendiente, se tienen muchos sectores de amenaza alta y media en pendientes muy bajas (**Anexo 18B**).

9. DISCUSIÓN

Este proyecto evaluó la distribución del FS para el escenario saturado y el escenario actual en los métodos determinísticos del SGC (2015), TRIGRS y Scoops3D para compararlos mediante los índices propuestos por Sorbino et al. (2010), con el objetivo de precisar el método y el escenario más apropiado para representar la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia. Los resultados muestran que los métodos de SGC (2015) y TRIGRS logran representar detalladamente la amenaza de acuerdo con la pendiente, mientras que Scoops3D generaliza las categorías de amenaza en la zona de estudio. A continuación, se comparan los resultados obtenidos.

Tabla 2. Análisis comparativo entre los resultados de cada método por escenario analizado con base en los índices definidos por Sorbino et al. (2010).

Índice	SGC (2015)		Scoops3D		TRIGRS	
	Actual-Tr25	Saturado	Actual-Tr25	Saturado	Actual-Tr25	Saturado
Índice de éxito (SI)	33.9%	50.8%	0%	45.5%	37.5%	76.3%
Índice de error (EI)	27.3%	36.7%	1.8%	31.9%	32.3%	56.8%
SI/EI	1.24	1.38	0	1.43	1.16	1.34

Teniendo en cuenta que el modelo con mejor desempeño es el de mayor relación entre el índice de éxito (SI) y el índice de error (EI) (Sorbino et al., 2010), los resultados obtenidos indican que, en los tres métodos determinísticos, los escenarios saturados tuvieron mejores resultados que los escenarios actuales (Tabla 2). Puesto que se asumió una condición inicial del nivel freático constante a lo largo del terreno, en los escenarios actuales se pudo haber subestimado la inestabilidad del terreno en los escarpes cartografiados, reflejándose en índices de éxitos menores a 37.5% y relaciones SI/EI más bajas en comparación a los escenarios saturados (Tabla 2). Esto parece confirmar, en el marco de la gestión del riesgo, que es conveniente simular el escenario saturado para zonificar la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia, ya que de esta forma se asegura abarcar los sitios de mayor inestabilidad y también zonificar en amenaza alta aquellos que eventualmente puedan ser inestables ante un ascenso del nivel freático. Aunque habría riesgo de obtener índices de error elevados como en el caso del escenario saturado de TRIGRS. Esto demuestra que es mejor realizar esta condición en métodos que no requieren modelos hidrológicos-hidráulicos como el SGC (2015) y Scoops3D, teniendo siempre presente cuál de las dos bases físicas pueda adaptarse mejor a las características de los deslizamientos en la zona de estudio.

De los escenarios saturados, con un valor de 1.43 de la relación SI/EI, el método de Scoops3D inicialmente sería el más apropiado para zonificar la amenaza por movimientos en masa. Sin embargo, respecto al valor obtenido (1.38) para el escenario saturado del SGC (2015) solo hay 0.05 de diferencia (Tabla 2). De acuerdo con Michel et al., (2014), serían valores muy similares para tomar una decisión acerca del desempeño de cada modelo considerando que existe cierto grado de incertidumbre aplicando la relación SI/EI,

relacionado con el hecho de que, dentro de los escarpes cartografiados toda el área sea efectivamente inestable. Adicionalmente, en ambos casos el comportamiento individual del índice de éxito y el índice de error son muy similares (Tabla 2). Esto debido a que las zonas de inestabilidad se localizan prácticamente en los mismos taludes para ambos modelos. Esta observación sugiere que, aunque Scoops3D logre representar los posibles deslizamientos profundos en la zona de estudio, que se puedan presentar debido a la baja permeabilidad del suelo (Aristizábal Giraldo et al., 2022), el método del SGC (2015) también logra identificar las mismas zonas en amenaza alta, en un tiempo de ejecución menor. Además, el modelo del SGC (2015) se destaca sobre Scoops3D en la zona de estudio porque tiene mayor índice de éxito; pues el FS obtenido por el método de talud infinito en cada celda del terreno es más detallado y permitió delimitar los escarpes de mejor manera de acuerdo con la pendiente, en la categoría de amenaza alta (**Anexo 7**). Así mismo, teniendo en cuenta que la longitud de las laderas adyacentes al asentamiento urbano es mayor que las posibles profundidades de las superficies de deslizamientos, se esperaría que la longitud de los potenciales deslizamientos sean varios ordenes de magnitud mayor que la profundidad. De acuerdo con la base física de este método hipotéticamente podría ser más adecuado para modelar el mecanismo de falla en la zona de estudio (do Pinho & Augusto Filho, 2022; Michel et al., 2014; Xie et al., 2003). Por último, si se considera la relación SI/EI para el escenario actual en ambos casos, el del método SGC (2015) muestra mejor desempeño para representar las condiciones actuales de la cabecera municipal de Armenia (Tabla 2 y Figura 4A). Por lo tanto, se elige el escenario saturado y el modelo del SGC (2015) para representar la amenaza por movimientos en masa en el casco urbano de Armenia Mantequilla (Figura 4B), pues sería el que mejor modela en amenaza alta las zonas reales de mayor inestabilidad, sin sobrestimar su distribución en sectores estables. Si bien las relaciones SI/EI obtenidas para los otros métodos son similares, son lo suficiente significativas para identificar las deficiencias de cada modelo. Por ejemplo: para el escenario saturado de TRIGRS se sobreestimo en amenaza alta más de la mitad del área que en realidad es estable. Por el contrario, en el caso actual, los procesos morfodinámicos reales validan una baja tasa de predicción de movimientos en masa.

Es importante recalcar que esto no implica necesariamente que el modelo del SGC (2015) sea mejor que los demás. Por el contrario, bajo las limitaciones de este estudio la precisión

de los resultados en TRIGRS y Scoops3D se vio afectada. Por ejemplo, la falta de temporalidad de los procesos morfodinámicos impidió reconocer la intensidad y tiempo de la tormenta que los detonaron, que hubiera sido útil para determinar objetivamente las condiciones iniciales de infiltración, la duración e intensidad de lluvia ingresadas en TRIGRS, que son cruciales para obtener buenos resultados (He et al., 2021). En ese sentido, la duración de lluvia es el factor más sensible a la infiltración del agua en suelos de baja permeabilidad, como los de Armenia (Aristizábal Giraldo et al., 2022). Así mismo, considerando que la conductividad hidráulica y la difusividad pueden variar varios ordenes de magnitud en los materiales geológicos (Baum et al., 2008), los parámetros hidráulicos tomados de la bibliografía adicionan más incertidumbre al cálculo del FS, indicando que se pudo haber subestimado la infiltración del agua en el suelo. De hecho, la lluvia simulada en el escenario actual de TRIGRS no generó cambios significativos en la presión de poros inicial, que redujera drásticamente la resistencia al corte en las partículas del suelo. A su vez, esto explica en primer lugar, porque a diferencia de otros autores como Tran et al., (2018); He et al., 2021 y Palazzolo et al., (2021), aquí no se obtuvo buenos resultados cuando se complementó Scoops3D con TRIGRS, es decir, en el escenario actual de Scoops3D. En segundo lugar, aclara porque de los escenarios actuales el modelo del SGC (2015) fue el de mejor desempeño (mayor relación SI/EI); pues a diferencia de los otros, en este si se produjo un ascenso del nivel freático debido al evento de lluvia considerado. Aunque se debe dejar claro que no es del todo realista, porque el método del SCS desprecia la topografía del terreno en la infiltración del agua, en especial la pendiente, la curvatura y posibles procesos de recarga adicionales como flujos subterráneos (Gutiérrez Molano, 2020).

Por otra parte, no se contaba con las características de profundidad y tipos de deslizamientos de los procesos morfodinámicos presentes, que permitieran realizar una búsqueda de superficies potenciales de fallas objetiva en el modelo de Scoops3D. Con esto se quiere aclarar que, por sí sola, el área cartografiada de los escarpes reales no son valores apropiados para determinar el límite superior del tamaño de potenciales deslizamientos, pues erróneamente se pueden evaluar superficies de fallas muy profundas, en zonas donde no hay información precisa de estratigrafía y parámetros mecánicos. Esto es algo de lo que se habla poco y no se le da mucha importancia en la bibliografía del modelo Scoops3D,

pero realmente es uno de los parámetros de mayor sensibilidad del modelo (He et al., 2021). De hecho, si se hubiese tenido en cuenta el área real de los procesos cartografiados, así como en Corplanes (2022), más del 75% del área total del casco urbano hubiera quedado en amenaza alta (**Anexo 19**), generando altos índices de errores, que disminuían el desempeño del modelo y no representaban las condiciones reales de amenaza en Armenia, como resultado de evaluar deslizamientos de hasta 30 metros de profundidad. Por esta razón, los escenarios analizados en este trabajo para Scoops3D se limitaron con un tamaño máximo, indiscriminadamente, de tal forma que se alcanzaran profundidades más realistas, de ~13 metros (**Anexo 20**). Esta corrección permitió disminuir el índice de error al 31.9% sin dejar de predecir en amenaza alta las mismas zonas, mejorando notablemente el desempeño del escenario saturado en comparación a Corplanes (2022). Caso contrario sucede en el escenario actual de Scoops3D. En este caso los procesos morfodinámicos reales no se modelaron en amenaza alta, en primer lugar, por lo que se había dicho anteriormente sobre la baja influencia de la tormenta en la presión de poros de TRIGRS, y en segundo lugar, puesto que al considerar un tamaño menor de superficies de falla, la masa evaluada del potencial deslizamiento es menor, y por ende, la fuerza cortante en la falla disminuía aumentando el FS. Por otro lado, a diferencia de los modelos de talud infinito, gráficamente los mapas de estabilidad en Scoops3D muestran FS generalizados en zonas circulares a lo largo de muchas celdas del terreno, porque en cada superficie de falla se establece el FS mínimo encontrado.

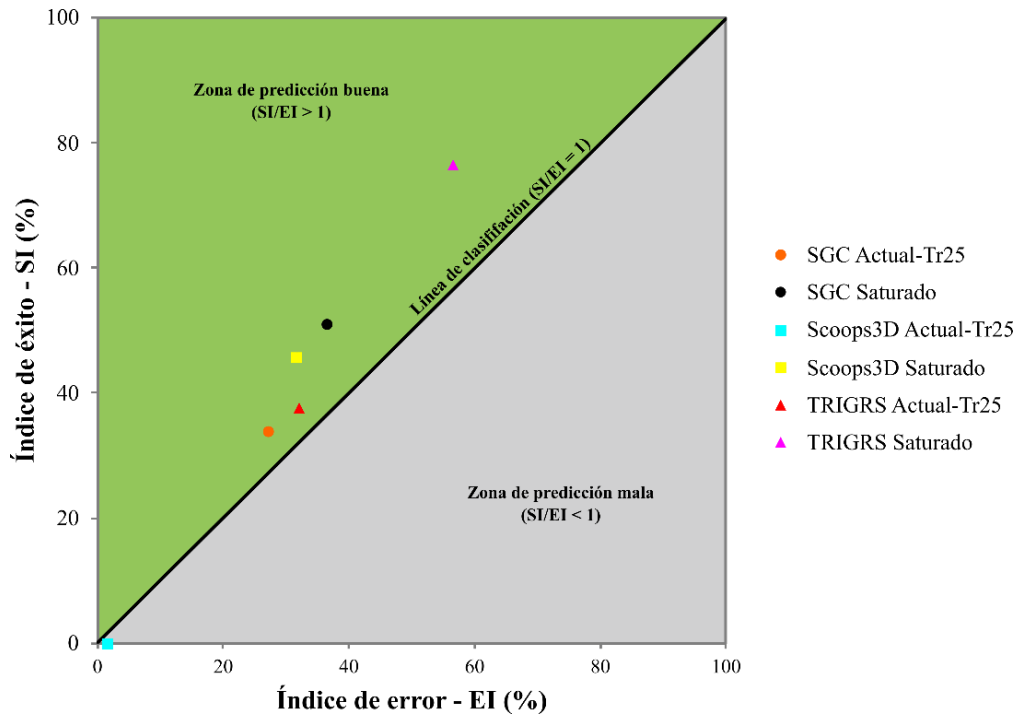


Figura 7. Desempeño de los diferentes escenarios y métodos evaluados a través del Índice de Éxito (SI) y el Índice de Error (EI). El área verde indica predicciones exitosas ($SI/EI > 1$), mientras que el área gris indica predicciones pobres ($SI/EI < 1$). Tomado y adaptado de Song et al., (2020).

A pesar de todas las limitaciones anteriormente descritas, excluyendo el valor del escenario actual del modelo Scoops3D, el rango obtenido de las relaciones SI/EI en este estudio se encuentran por encima de la línea de clasificación aleatoria ($SI/EI > 1$) (Figura 7), indicando resultados aceptables de los diferentes modelos evaluados (Kim et al., 2016; Song et al., 2020). Valores similares encontró Pinho & Augusto Filho (2022) para suelo residual de granito y filita en los modelos de talud infinito y TRIGRS. Por una parte, otros autores como Sorbino et al., (2010) reportan valores menores al 15% para el índice de error en el modelo de TRIGRS, alcanzando relaciones SI/EI entre el 5 y 3.5. Por otro lado, Grelle et al., (2014) consiguió 6.6 para el mismo modelo; mientras que para Scoops3D no se encontraron trabajos en los que apliquen este índice. Lo anterior no quiere decir que hayan obtenido mejores resultados en esos estudios, porque es necesario recalcar que se pueden obtener altas relaciones SI/EI para índices de éxito e índices de errores pequeños o muy altos (p.ej. 8/2 o 94/40), por lo que se debe analizar cada uno por separado. Además, estos índices dependen mucho de la completitud del inventario de procesos morfodinámicos y de

la correcta delimitación de las áreas fuentes de los movimientos en masas, que en muchos casos es difícil determinar con exactitud.

Particularmente en este trabajo, considerando los pocos procesos morfodinámicos presentes en la zona de estudio es posible que se esté sobrestimando un porcentaje del índice de error. Además, teniendo en cuenta que en todos los casos existen tanto zonas modeladas en amenaza alta donde no ha habido procesos morfodinámicos (falsos positivos), como zonas modeladas en amenaza baja donde se han presentado movimientos en masa (falsos negativos), probablemente la discretización de unidades geotécnicas realizada tanto lateralmente como en profundidad no haya sido la más adecuada, debido a que generalizar valores de nivel freático, cohesión, ángulo de fricción y peso unitario para cada unidad geológica a lo largo de toda la zona de estudio, pudo aumentar o disminuir el FS falsamente dependiendo de la sensibilidad del modelo frente a cada variable. Aunque los resultados indicaron que el área más inestable se encuentra ubicada hacia el talud norte de la cabecera municipal, esta puede ser un artificio de los parámetros mecánicos y de la pendiente alta en este sector, debido a la “baja resolución” de celda en algunos sectores donde se complementó con el DEM de 10 m. De ahí que sea importante reconocer en los modelos determinísticos la sensibilidad a la variable más influyente, con el fin de orientar todos los recursos posibles en determinarla con precisión a lo largo del terreno. En el caso de la cabecera municipal de Armenia, los resultados indicaron que las zonas en amenaza alta se localizan en pendientes mayores a 22° . Dichos valores están soportados por autores como Rashid et al., (2020) y Melo et al., (2021), quienes reportan que en sectores con un alto gradiente de pendiente ($>26^\circ$), la tasa de erosión y el aumento en los esfuerzos cortantes en el suelo, incrementa la tendencia de los deslizamientos.

10. CONCLUSIONES

En la zona de estudio la pendiente es un factor determinante en la estabilidad del terreno. La categoría de amenaza alta está relacionada especialmente con el suelo residual y saprolito en pendientes mayores a 22° . Por eso se recomienda evitar, en la medida de lo posible definir zonas de expansión urbanas en sectores de muy alta pendiente, realizar un buen manejo de aguas superficiales y evitar la deforestación, para disminuir al máximo la tasa de erosión del suelo con el fin de reducir la probabilidad de los deslizamientos.

Aunque el índice de éxito (SI) y el índice de error (EI) no deben ser usados para tomar una decisión definitiva del desempeño de los modelos, son útiles para realizar una validación inicial objetiva que permita identificar los mejores resultados.

Cualquiera de los tres modelos evaluados en este estudio puede ser usado para determinar la amenaza frente a deslizamientos. Sin embargo, en Scoops3D se debe tener especial cuidado al momento de realizar la búsqueda de superficies potenciales de falla, ya que erróneamente se pueden evaluar deslizamientos muy profundos, en zonas donde no hay información precisa de estratigrafía y parámetros mecánicos. En TRIGRS, se puede subestimar la infiltración del agua en el suelo si no se utilizan los parámetros hidráulicos reales, intensidades y periodos de precipitación de referencia que anteriormente hayan detonado movimientos en masa. En el SGC (2015), la manera en que se determina el nivel freático para un determinado tiempo de retorno es empírica y subjetiva, al no considerar la topografía del terreno se puede sobreestimar el ascenso del nivel freático.

El nivel freático es uno de los parámetros más influyentes en la estabilidad del terreno, ya que sus condiciones iniciales determinan en gran medida los factores de seguridad de un sitio. Cuando su distribución a lo largo de un terreno no es clara, se recomienda simular el escenario saturado con el fin de identificar los sectores de mayor inestabilidad y, aquellos que eventualmente puedan serlos ante un ascenso del nivel freático.

A pesar de todas las ventajas que pueda tener TRIGRS y Scoops3D sobre SGC (2015), como: la implementación del modelo de infiltración de agua en el suelo y el enfoque tridimensional, respectivamente. También presentan limitaciones relacionadas con la toma de datos hidrológicos-hidráulicos y el tamaño de los deslizamientos, respectivamente. Si no se tiene la forma de medir todos los parámetros de entrada para estos modelos (Tabla 1), es aconsejable utilizar SGC (2015) ya que es más rápido, simple y eficaz. Además, tiene la ventaja que no requiere de otro software para visualizar los resultados, pues en ArcMap es posible ejecutarlo.

En la zonificación por movimientos en masa no existen métodos determinísticos mejor que otros, existen situaciones que hacen unos más apropiados que otros. Cada método presenta bases físicas diferentes que pueden representar de mejor o peor manera los mecanismos de fallas en una zona. TRIGRS y SGC (2015) son más adecuados para deslizamientos

traslacionales, mientras que Scoops3D para deslizamientos rotacionales. Al final, son las condiciones meteorológicas y geológicas que determina las características de los potenciales deslizamientos a lo largo de un terreno. Lo realmente importante al momento de evaluar la amenaza por movimientos en masa en un municipio, primeramente, es definir los tipos de fallas presentes o que puedan presentarse, para luego, buscar el método que mejor se adapte a los tipos de movimientos en masa y a los parámetros de entrada disponibles. Para el caso específico de Armenia el método determinístico de SGC (2015) fue más exacto.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Alvioli, M., & Baum, R. L. (2016). Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface. *Environmental Modelling & Software*, 81, 122-135.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.002>
- ÁREA, & UNAL. (2018). *Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial* (Informe final Contrato N° 715 de 2017-Documenro 1; p. 350). Área metropolitana del Valle de Aburrá.
- Aristizábal Giraldo, E. V., García Aristizábal, E., Marín Sánchez, R., Gómez Cardona, F., & Guzmán Martínez, J. C. (2022). Rainfall-intensity effect on landslide hazard assessment due to climate change in north-western Colombian Andes. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 103, 51-56. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201215>
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2008). *TRIGRS-A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0* [Informe abierto]. United State Geological Survey (USGS). <https://pubs.usgs.gov/of/2008/1159/>
- Bell, F. G. (2009). *Engineering geology* (2. ed., repr.transferred to digital print). Elsevier.
- Budhu, M. (2015). *Soil mechanics fundamentals*. John Wiley & Sons.
- Carter, M., & Bentley, S. P. (1991). *Correlations os soil properties*. Pentech Press.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada* (McGraw-Hill, Inc.). Editorial Nomos S.A.
- CMGRD. (2015). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD)*.
https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28393/PMGRD_ArmeniaAntioquia_2015.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Corplanes. (2019). *Estudios Básicos de Amenaza Municipio de Caramanta* (p. 313) [Informe técnico].
CORANTIOQUIA. https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/SUELO/AIRNR_040_CV1906_102.pdf
- Corplanes. (2021). *Estudios Básicos de Amenaza Municipio de Montebello* (p. 275) [Informe final].
CORANTIOQUIA.

https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/GESTI%C3%93N%20DEL%20RIESGO/AIRNR_040_CV2009_84_2020.pdf

Corplanes. (2022). *Estudios Básicos de Amenaza Municipio de Armenia* (p. 372).

do Pinho, T. M., & Augusto Filho, O. (2022). Landslide susceptibility mapping using the infinite slope, SHALSTAB, SINMAP, and TRIGRS models in Serra do Mar, Brazil. *Journal of Mountain Science*, 19(4), 1018-1036. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7057-z>

EAFIT. (2019). *Estudio básico de amenaza para la revisión del EOT del municipio de Jericó*.

https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/SUELO/AIRNR_040_COV_1905_53.pdf

Esquema de ordenamiento territorial (EOT)—Municipio de Armenia, Antioquia. (1999). <http://www.armenia-antioquia.gov.co/normatividad/esquema-de-ordenamiento-territorial-eot>

Fajardo Fonseca, O. E. (2019). *EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE TENZA, DEPARTAMENTO DE BOYACÁ*. [Trabajo de grado - Especialización]. Universidad Católica de Manizales.

García Aristizábal, E. F., Aristizabal Giraldo, E. V., Marín Sánchez, R. J., & Guzman Martinez, J. C. (2019).

Implementación del modelo TRIGRS con análisis de confiabilidad para la evaluación de la amenaza a movimientos en masa superficiales detonados por lluvia. *TecnoLógicas*, 22(44), 111-129.

<https://doi.org/10.22430/22565337.1037>

Grelle, G., Soriano, M., Revellino, P., Guerriero, L., Anderson, M. G., Diambra, A., Fiorillo, F., Esposito, L., Diodato, N., & Guadagno, F. M. (2014). Space-time prediction of rainfall-induced shallow landslides through a combined probabilistic/deterministic approach, optimized for initial water table conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(3), 877-890.

<https://doi.org/10.1007/s10064-013-0546-8>

Gu, T., Wang, J., Fu, X., & Liu, Y. (2015). GIS and limit equilibrium in the assessment of regional slope stability and mapping of landslide susceptibility. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(4), 1105-1115. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0689-2>

Gutiérrez Molano, L. A. (2020). *VARIABILIDAD DEL NIVEL FREÁTICO EN FUNCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN INFILTRADA A UN PERIODO DE RETORNO DE 20 AÑOS SEGÚN EL SGC*,

- EN EL SECTOR ARENERAS, MUNICIPIO DE SOGAMOSO* [Trabajo de grado - Especialización].
Universidad Católica de Colombia.
- He, J., Qiu, H., Qu, F., Hu, S., Yang, D., Shen, Y., Zhang, Y., Sun, H., & Cao, M. (2021). Prediction of spatiotemporal stability and rainfall threshold of shallow landslides using the TRIGRS and Scoops3D models. *CATENA*, *197*, 104999. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104999>
- Hodnett, M. G., & Tomasella, J. (2002). Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. *Geoderma*, *108*(3-4), 155-180. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00105-2)
- Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, *36*(7), 1897-1910. <https://doi.org/10.1029/2000WR900090>
- Jaramillo González, R. (2019). *Definición de susceptibilidad por movimientos en masa en suelo urbano escala 1:2000 a partir de modelos determinísticos usando el modelo físico distribuido de análisis de estabilidad tridimensional Scoops3D. Caso de estudio: San José la Cima* [Trabajo de grado - Pregrado]. Universidad EAFIT.
- Kim, M. S., Onda, Y., Uchida, T., & Kim, J. K. (2016). Effects of soil depth and subsurface flow along the subsurface topography on shallow landslide predictions at the site of a small granitic hillslope. *Geomorphology*, *271*, 40-54. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.031>
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, *249*, 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Luján Rivas, J. F. (2019). *Análisis tridimensional de equilibrio límite por movimientos en masa para la cuenca hidrográfica de la quebrada La Linda en la vereda Monte Loro en Ciudad Bolívar (Antioquia) mediante el programa Scoops 3D* [Trabajo de grado - Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Luo, H. Y., Zhou, W., & Huang, S. L. (Eds.). (2009). *GIS-Based Approaches to Earthquake-induced Landslide Hazard Zonation*.
- Marin, R. J., García, E. F., & Aristizábal, E. (2021a). Assessing the Effectiveness of TRIGRS for Predicting Unstable Areas in a Tropical Mountain Basin (Colombian Andes). *Geotechnical and Geological Engineering*, *39*(3), 2329-2346. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01630-w>

- Marin, R. J., Velásquez, M. F., García, E. F., Alvioli, M., & Aristizábal, E. (2021c). Assessing two methods of defining rainfall intensity and duration thresholds for shallow landslides in data-scarce catchments of the Colombian Andean Mountains. *CATENA*, *206*, 105563.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105563>
- Marin, R. J., Velásquez, M. F., & Sánchez, O. (2021b). Applicability and performance of deterministic and probabilistic physically based landslide modeling in a data-scarce environment of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, *108*, 103175.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103175>
- Meena, V., Kumari, S., & Shankar, V. (2022). Physically based modelling techniques for landslide susceptibility analysis: A comparison. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1032*(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1032/1/012033>
- Mejía, M. (1984). *Geología y geoquímica de las planchas 130 (Santa fe de Antioquia) 146 (Medellín occidental)* [Memoria explicativa]. INGEOMINAS.
- Melo, C. M., Kobiyama, M., Michel, G. P., & de Brito, M. M. (2021). The Relevance of Geotechnical-Unit Characterization for Landslide-Susceptibility Mapping with SHALSTAB. *GeoHazards*, *2*(4), 383-397. <https://doi.org/10.3390/geohazards2040021>
- Michel, G. P., Kobiyama, M., & Goerl, R. F. (2014). Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, *14*(7), 1266-1277. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0886-4>
- Mohr, D. L., Wilson, W. J., & Freund, R. J. (2022). Nonparametric Methods. En *Statistical Methods* (pp. 651-683). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823043-5.00014-X>
- Nhu, H. V., Duong, B. V., & Vu, H. D. (2019). *3D slopes stability modeling for landslide early warning design at Halong city area*. *60*(6), 11.
- Osorio Ríos, L., Montoya Noguera, S., Ramos Rivera, J., & Parra Holguín, D. (2022). Reliability and Sensitivity Analysis of Rainfall-Induced Shallow Landslides Using Trigrs Model. Case Study: San Antonio De Prado. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4076168>

- Palazzolo, N., Peres, D., Bordoni, M., Meisina, C., Creaco, E., & Cancelliere, A. (2021). Improving Spatial Landslide Prediction with 3D Slope Stability Analysis and Genetic Algorithm Optimization: Application to the Oltrepò Pavese. *Water*, 13(6), 801. <https://doi.org/10.3390/w13060801>
- Park, D. W., Nikhil, N. V., & Lee, S. R. (2013). Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2833-2849. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2833-2013>
- Puth, M.-T., Neuhäuser, M., & Ruxton, G. D. (2015). Effective use of Spearman's and Kendall's correlation coefficients for association between two measured traits. *Animal Behaviour*, 102, 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2015.01.010>
- Raia, S., Alvioli, M., Rossi, M., Baum, R. L., Godt, J. W., & Guzzetti, F. (2014). Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: A probabilistic approach. *Geoscientific Model Development*, 7(2), 495-514. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-495-2014>
- Rashid, B., Iqbal, J., & Su, L. (2020). Landslide susceptibility analysis of Karakoram highway using analytical hierarchy process and scoops 3D. *Journal of Mountain Science*, 17(7), 1596-1612. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5195-8>
- Reid, M. E., Christian, S. B., Brien, D. L., & Henderson, S. T. (2015). *Scoops3D: Software to analyze 3D slope stability throughout a digital landscape* (Techniques and Methods, Book 14, Chap. A1, p. 218) [Report]. U.S. Geological Survey. <http://dx.doi.org/10.3133/tm14A1>
- SGC. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano - SGC. <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19776>
- Shano, L., Raghuvanshi, T. K., & Meten, M. (2020). Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – a review. *Geoenvironmental Disasters*, 7(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0>
- Song, Z., Li, X., Lizárraga, J. J., Zhao, L., & Buscarnera, G. (2020). Spatially distributed landslide triggering analyses accounting for coupled infiltration and volume change. *Landslides*, 17(12), 2811-2824. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01451-1>

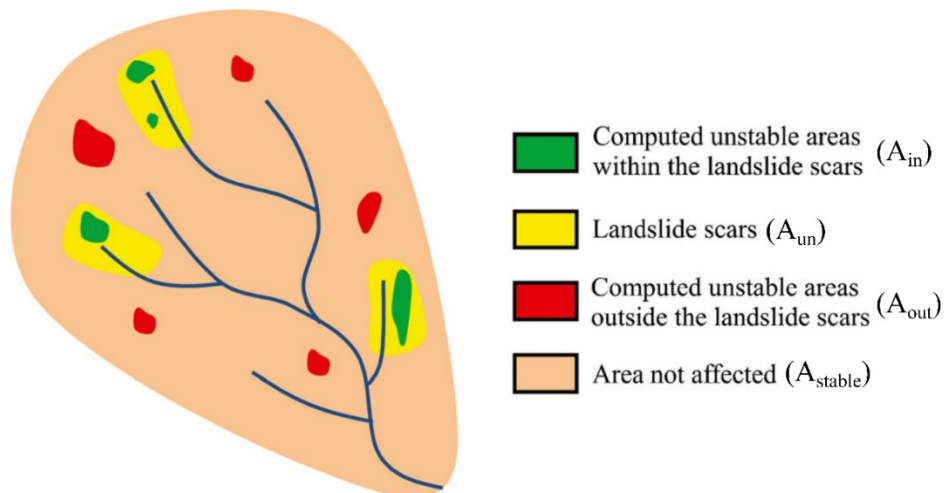
- Sorbino, G., Sica, C., & Cascini, L. (2010). Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. *Natural Hazards*, 53(2), 313-332. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9431-y>
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. Jhon Wiley & Sons, Inc. and Chapman & Hall, Limited.
- Tran, T. V., Alvioli, M., Lee, G., & An, H. U. (2018). Three-dimensional, time-dependent modeling of rainfall-induced landslides over a digital landscape: A case study. *Landslides*, 15(6), 1071-1084. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0931-7>
- UNGRD. (2020, agosto 19). *Riesgo por movimientos en masa en Colombia* [Portal]. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx>
- UNGRD. (2021). *Movimientos en Masa en Colombia, ¿dónde ocurren y cuáles son sus principales causas?* <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/32893>
- Van Westen, C. J. (2004). Geo-information tools for landslide risk assessment: An overview of recent developments. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/304346965>
- Xie, M., Esaki, T., Zhou, G., & Mitani, Y. (2003). Geographic Information Systems-Based Three-Dimensional Critical Slope Stability Analysis and Landslide Hazard Assessment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1109-1118. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:12\(1109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:12(1109))

12. ANEXOS

Anexo 1. Tabla de clasificación de la amenaza de un talud ante un deslizamiento.

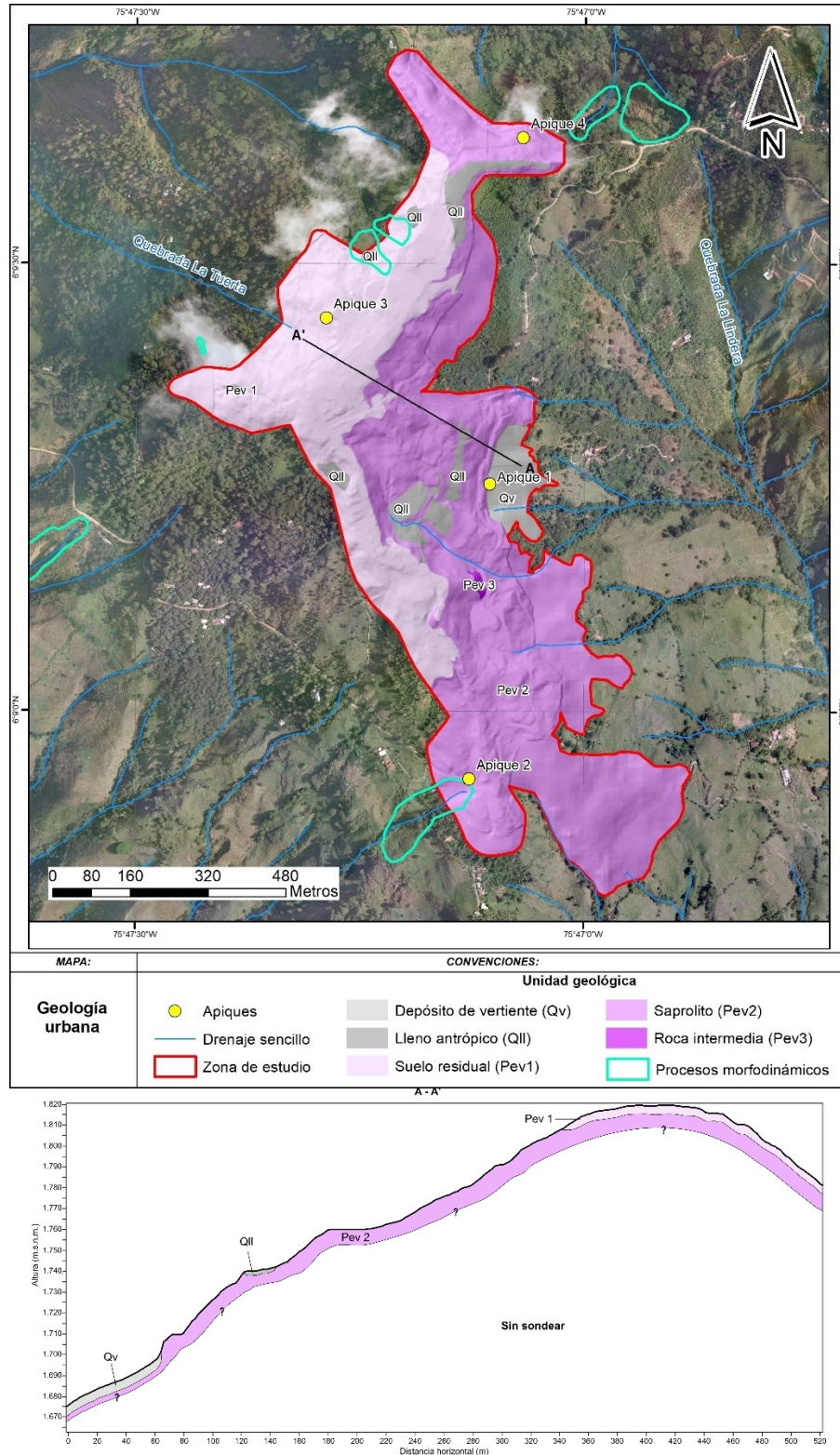
Categoría de amenaza	Factor de seguridad
Alta	<1.2
Media	1.2 – 1.5
Baja	>1.5

Anexo 2. Ilustración conceptual del índice de éxito (SI) y el índice de error (EI). Tomado y modificado de (Michel et al., 2014).

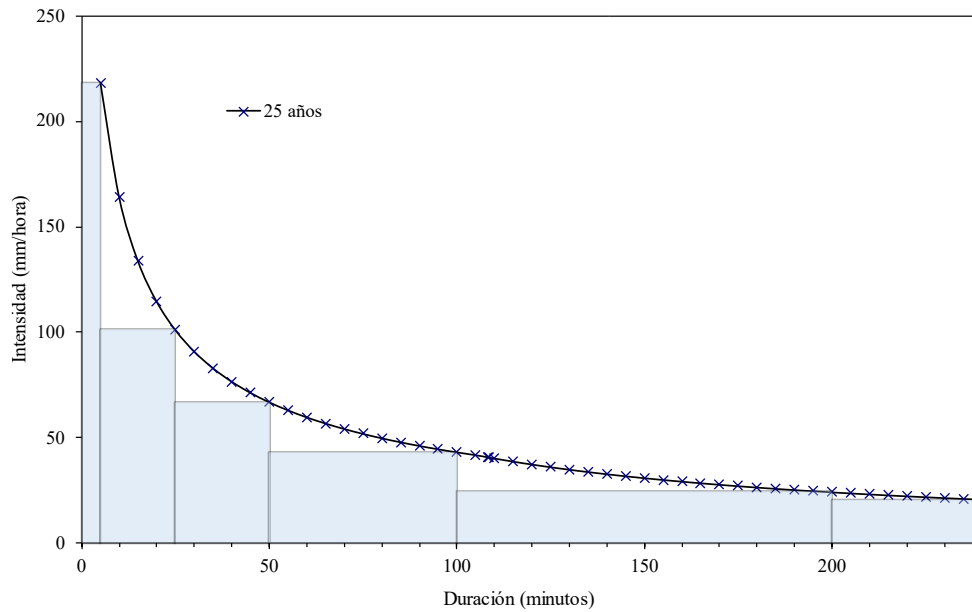


Anexo 3. Parámetros de entrada utilizados en cada modelo determinístico.

A) Geología y apiques en la zona de estudio.



B) Curva IDF de la estación Armenia (26200140) para un periodo de retorno de 25 años.
Tomada y modificada de (Corplanes, 2022).



C) Datos de los ensayos de laboratorio en cada apique realizado en la cabecera municipal de Armenia.

Apique	Unidad	Muestra	Profundidad	Grado de saturación	Clasificación USC	Clasificación USDA
Apique 1	Depósito de vertiente	M1.1	0.5 m	-	GC (grava arcillosa)	C (arcilloso)
		M1.2	1.4 m	-	MH (limo alta plasticidad)	SiC (arcillo limoso)
		M1.3	2 m	-	GC (grava arcillosa)	C (arcilloso)
Apique 2	Saprolito	M2	1 m	81.96%	MH (limo alta plasticidad)	SiC (arcillo limoso)
Apique 3	Suelo residual	M3.1	1 m	-	CH (arcilla alta plasticidad)	C (arcilloso)
		M3.2	1.4 m	-	CH (arcilla alta plasticidad)	C (arcilloso)
		M3.3	2 m	95%	MH (limo alta plasticidad)	SiC (arcillo limoso)
Apique 4	Saprolito	M4.1	1.5 m	80%	CL (arcilla baja plasticidad)	C (arcilloso)
		M4.2	2 m	-	CL (arcilla baja plasticidad)	C (arcilloso)

D) Espesor de las unidades geológicas en la zona de estudio.

Unidad geológica	Espesor (m)
Lleno antrópico	2
Suelo residual esquistos	4
Roca intermedia esquistos	2
Saprolito esquistos	7
Depósito de vertiente	5

E) Parámetros mecánicos para cada unidad geológica.

Unidad geológica	Cohesión (kPa)	Angulo de fricción (°)	Peso unitario del suelo (kN/m ³)
Lleno antrópico	21	25	15.69
Suelo residual esquistos	17	23	16.96
Roca intermedia esquistos	30.1	30.7	16.18
Saprolito esquistos	20	25	18.63
Depósito de vertiente	20	24	16.67

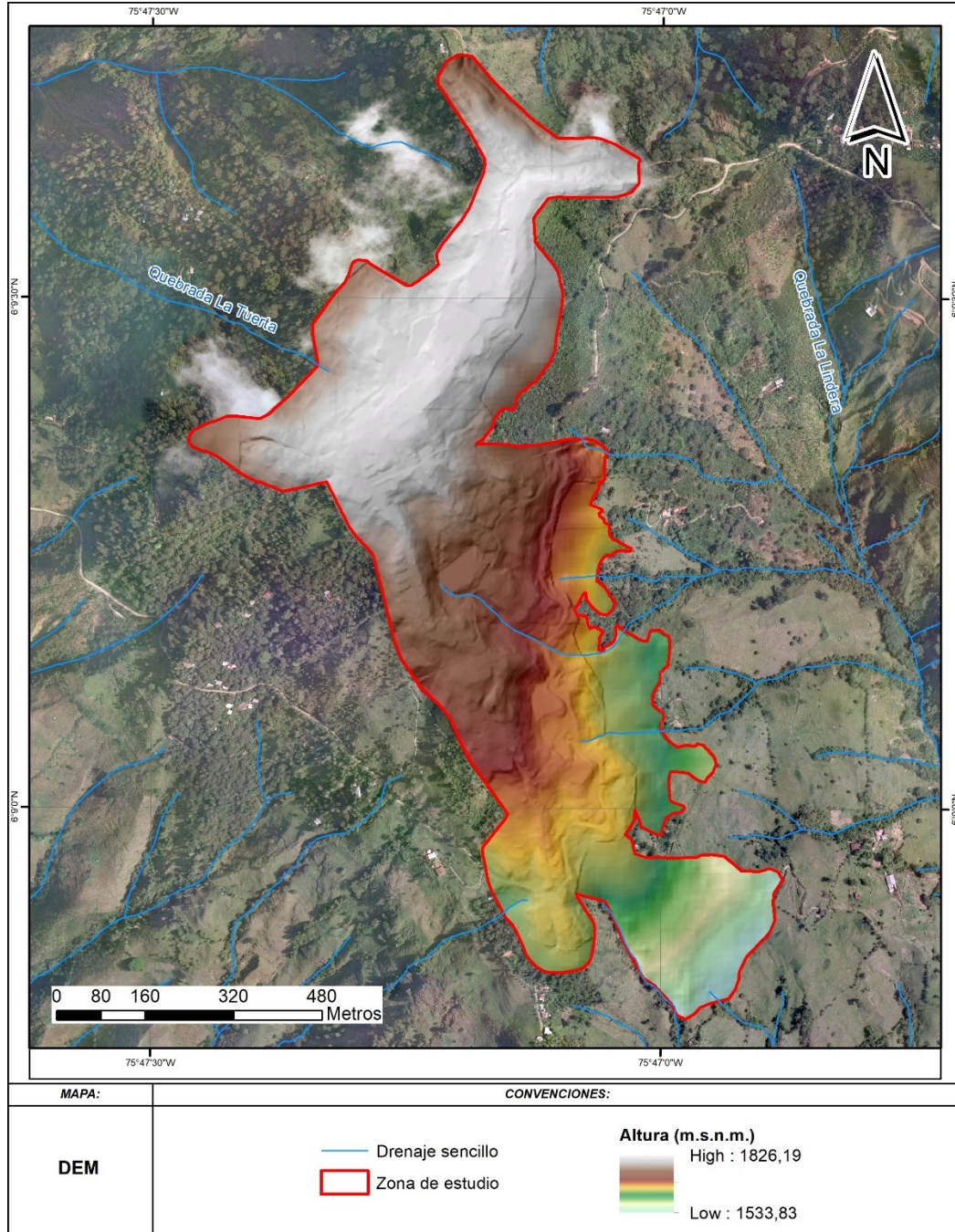
F) Parámetros hidráulicos para cada unidad geológica.

Unidad geológica	θ_s	θ_r	α	K_s (m/s)	D (m ² /s)	I_z (m ² /s)
Lleno antrópico	0.479	0.221	0.53	1.0e-07	1.0e-05	1.0e-09
Suelo residual esquistos	0.543	0.267	0.45	1.0e-09	1.0e-07	1.0e-11
Roca intermedia esquistos	-	-	-	1.0e-10	1.0e-08	1.0e-12
Saprolito esquistos	0.558	0.253	0.33	1.0e-09	1.0e-07	1.0e-11
Depósito de vertiente	0.558	0.253	0.33	1.0e-09	1.0e-07	1.0e-11

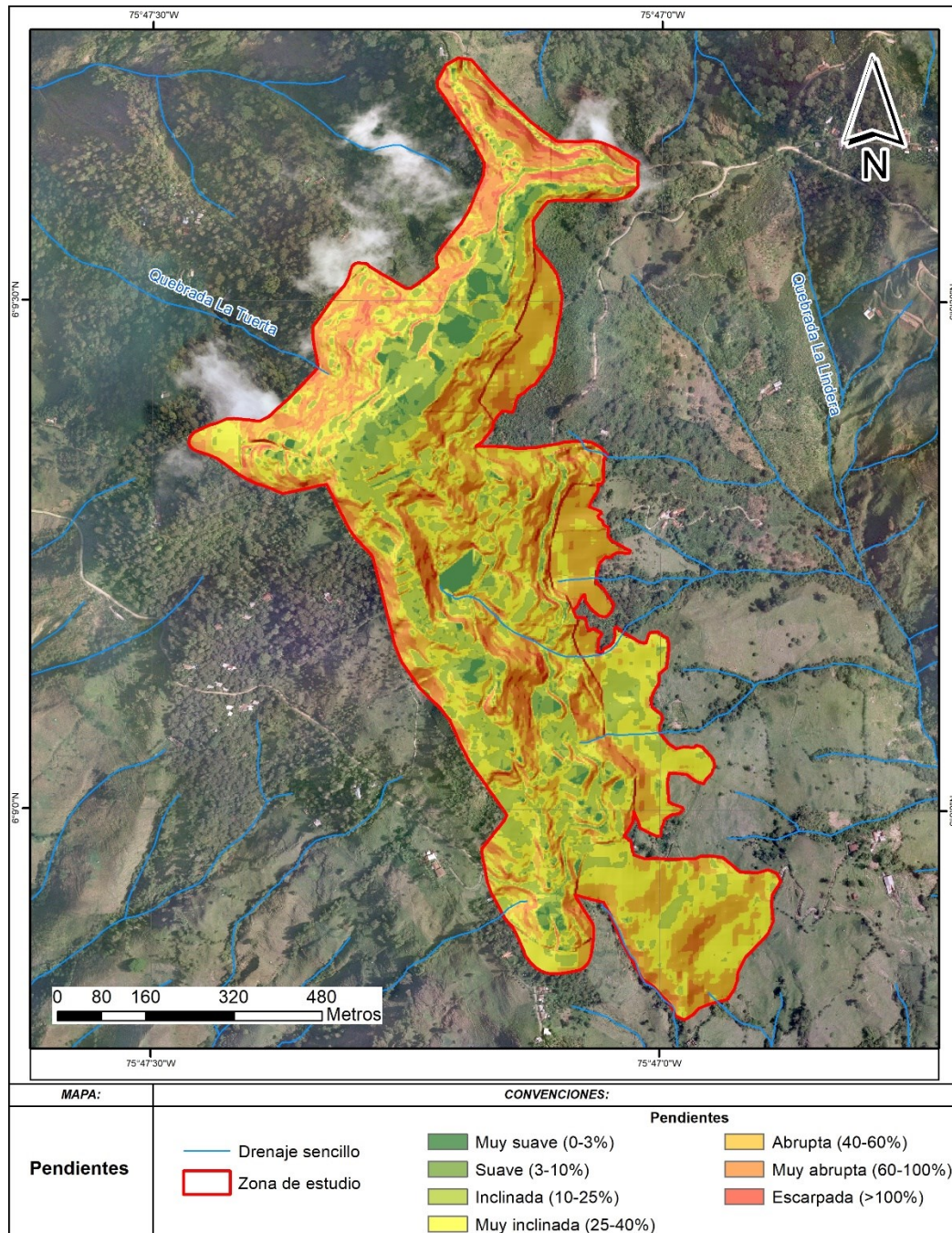
G) Nivel freático actual en la zona de estudio.

Nivel freático inicial
4 m

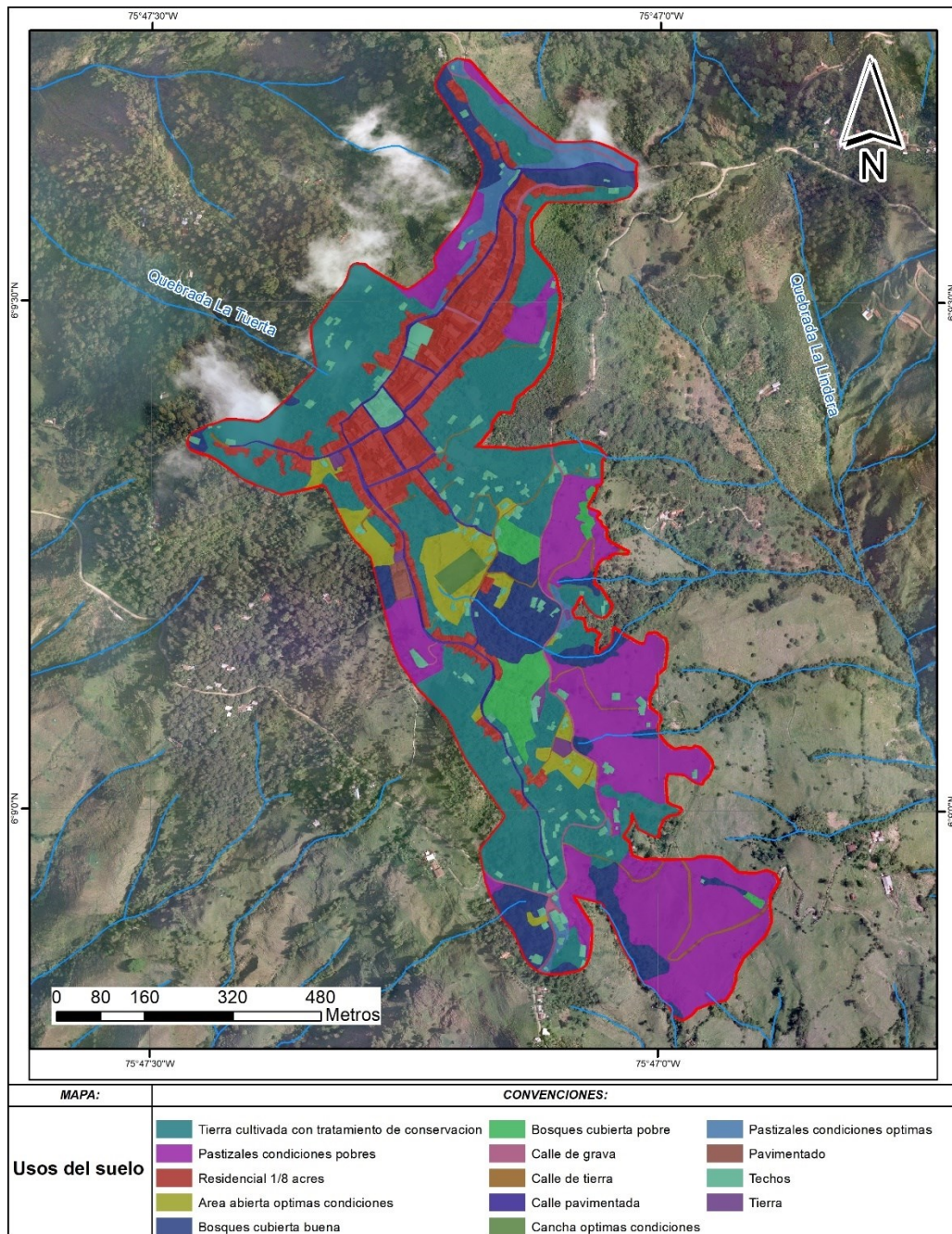
H) Modelo de elevación digital del terreno (DEM).



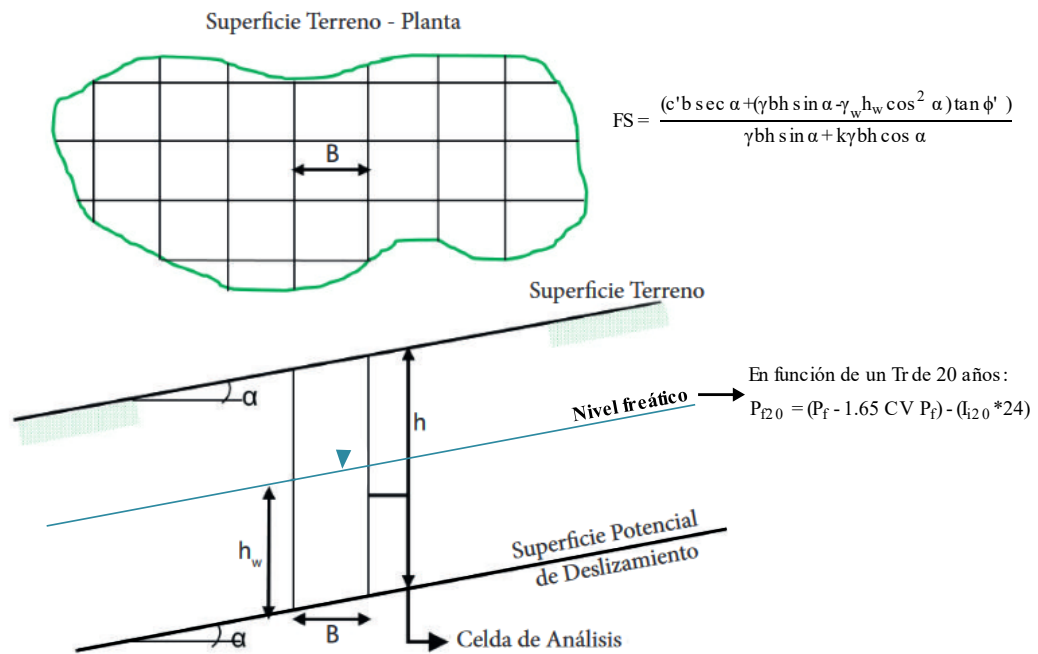
D) Pendientes en la zona de estudio.



J) Usos del suelo de las coberturas.



Anexo 4. Representación del modelo de talud infinito del método SGC (2015). Tomada y modificada de SGC (2015).



Donde c' y ϕ' son los parámetros de resistencia del suelo, cohesión y ángulo de fricción respectivamente, en la base de la columna de suelo en término de esfuerzos efectivos, h es la profundidad de la superficie de falla, se toma como la profundidad del suelo o hasta el contacto entre dos unidades de diferente comportamiento mecánico, α es el ángulo de inclinación de la superficie de falla que se puede asumir como el ángulo de la superficie del terreno en la celda, γ representa el peso unitario del suelo, b es el ancho de la celda, γ_w corresponde al peso unitario del agua, k el coeficiente de aceleración sísmica horizontal (cero en este caso) y h_w es la altura de la lámina de agua determinada a partir del nivel freático (SGC, 2015).

Donde P_{f20} corresponde a la profundidad del nivel freático asociado a una lluvia de 20 años de periodo de retorno, en milímetros. P_f es la profundidad media de nivel freático también en milímetros, I_{i20} representa la intensidad de la lluvia infiltrada diaria para un periodo de retorno de 20 años, de acuerdo con el valor de precipitación en 24 hrs de la curva IDF estimada para la localidad, en milímetros por hora, y $CV P_f$ corresponde a la desviación estándar asignada a la variación del nivel freático, expresada en términos del coeficiente de variación de los acumulados anuales de precipitación infiltrada (SGC, 2015). Esta

precipitación infiltrada (P_i) es calculada a partir de la ecuación del método lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, donde se determina la cantidad de agua proveniente de una tormenta (P) que se convierte en escorrentía (P_e), pero que en este caso se propone utilizar para estimar el complemento, es decir, $P_i = P - P_e$ (SGC, 2015).

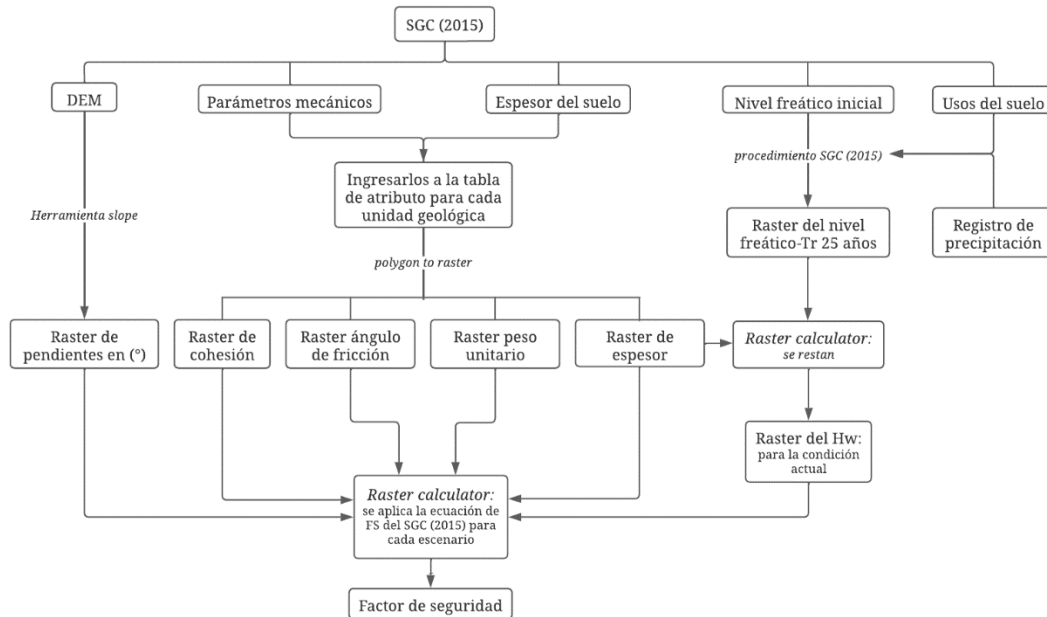
$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P - 0.8S} ; \text{Tomada de (Chow et al., 1994).}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 ; \text{Tomada de (SGC, 2015).}$$

Donde P_e y P están en mm, S corresponde a la retención potencial máxima en mm, que depende del número de curva (CN) de cada unidad geológica, para una condición de humedad antecedente II. A su vez, el CN es calculado mediante una tabla empírica que relaciona los grupos hidrológicos del suelo A, B, C o D del SCS con los usos del suelo, con un puntaje de 0 a 100, para superficies permeables a impermeables, respectivamente (Chow et al., 1994). En SGC (2015) y Chow et al., (1994) se presenta una descripción detallada de la tabla y las características de los suelos según el grupo hidrológico.

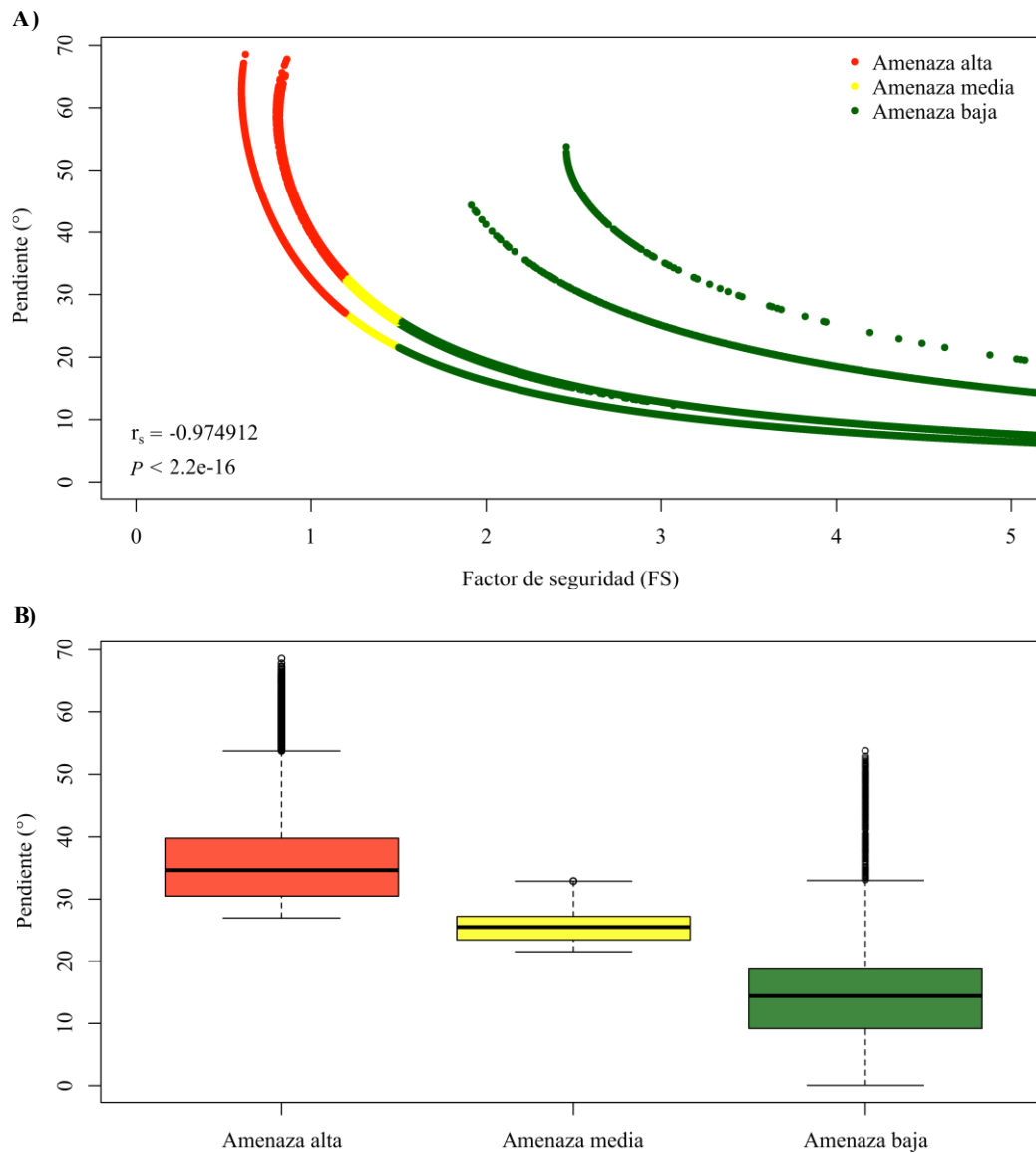
Anexo 5. Procedimiento para calcular el factor de seguridad en SGC (2015).

El procedimiento para calcular el factor de seguridad se llevó a cabo en ArcMap de la siguiente manera:

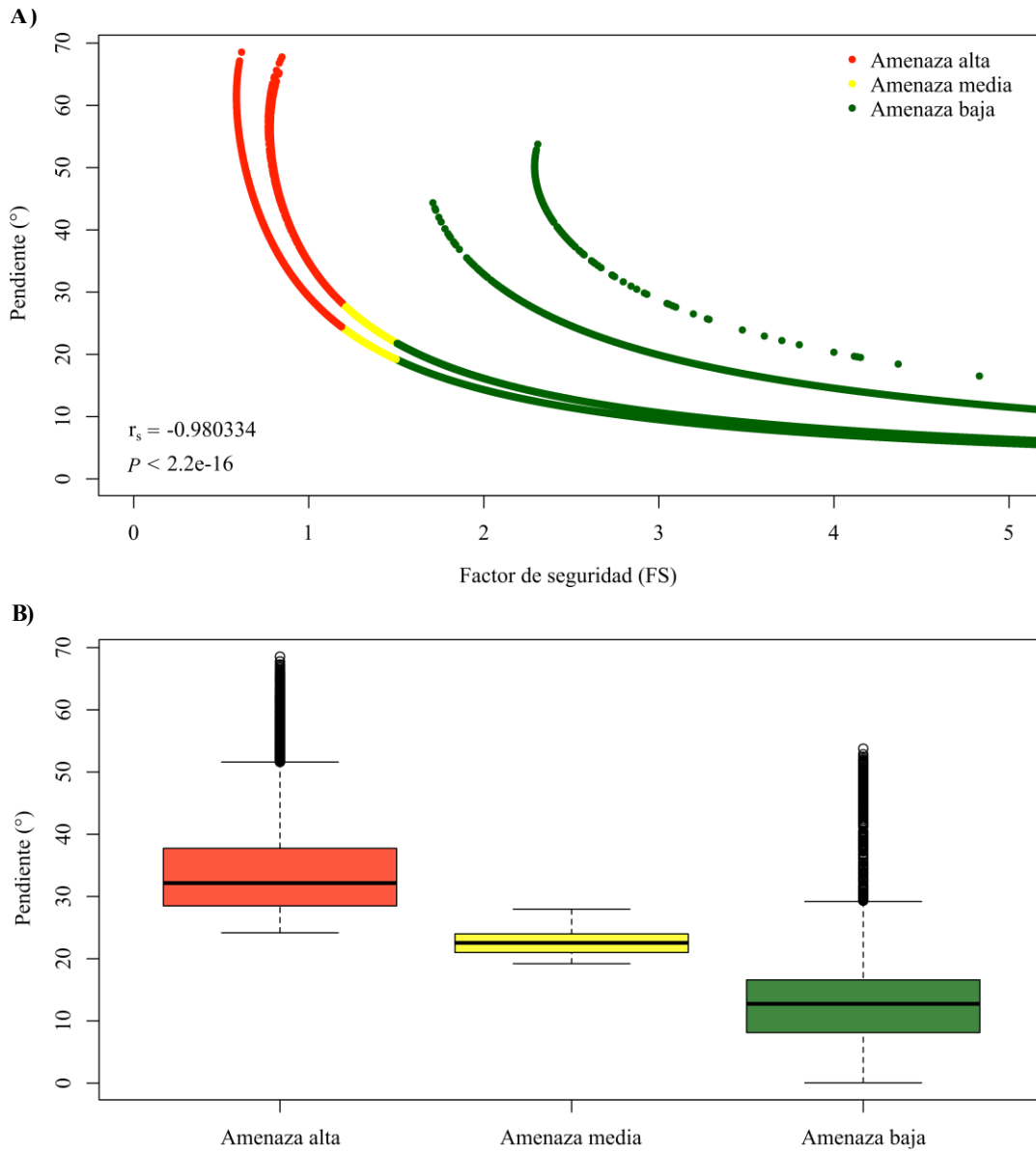


- 1) Se determinó el nivel freático para un periodo de retorno de 25 años siguiendo el procedimiento planteado en SGC (2015). Para esto se tuvo en cuenta los usos del suelo y la variabilidad de la precipitación infiltrada multianual con base en el registro de precipitación de la estación pluviométrica Armenia.
- 2) Luego, en la tabla de atributo del shapefile de geología se ingresaron la cohesión, ángulo de fricción, peso unitario y espesor para cada unidad, con el fin de convertirlos raster por medio de la herramienta *polygon to raster*.
- 3) Por otro lado, se generó el raster de pendientes en grados (°) aplicando la herramienta *slope* en el DEM. Posteriormente, en *raster calculator* se restaron el raster de espesor y nivel freático-Tr25 (obtenido del paso 1), a fin de calcular Hw.
- 4) Finalmente, en *raster calculator* se creó y se aplicó la Ecuación 3 para calcular el factor de seguridad en el escenario actual y saturado, utilizando los anteriores rasters como variables de entrada.

Anexo 6. Relación de la pendiente con el factor de seguridad para el escenario actual-Tr25 en el SGC (2015). (A) Factor de seguridad vs Pendiente. (B) Diagrama de cajas y bigotes de las categorías de Amenaza vs Pendiente.



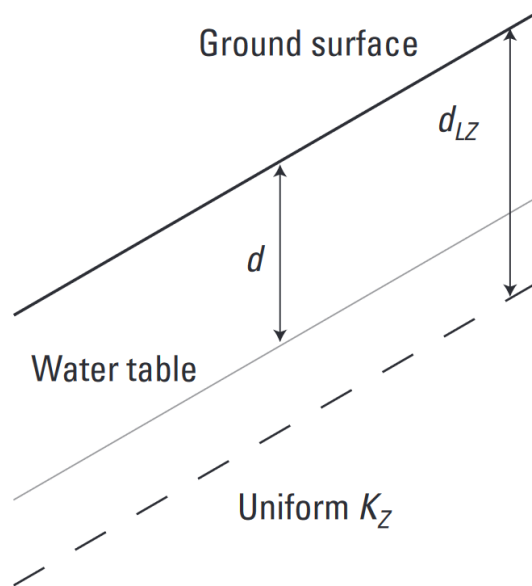
Anexo 7. Relación de la pendiente con el factor de seguridad para el escenario saturado en el SGC (2015). (A) Factor de seguridad vs Pendiente. (B) Diagrama de cajas y bigotes de las categorías de Amenaza vs Pendiente.



Anexo 8. Tabla de clasificación de la pendiente con base en Corplanes (2022).

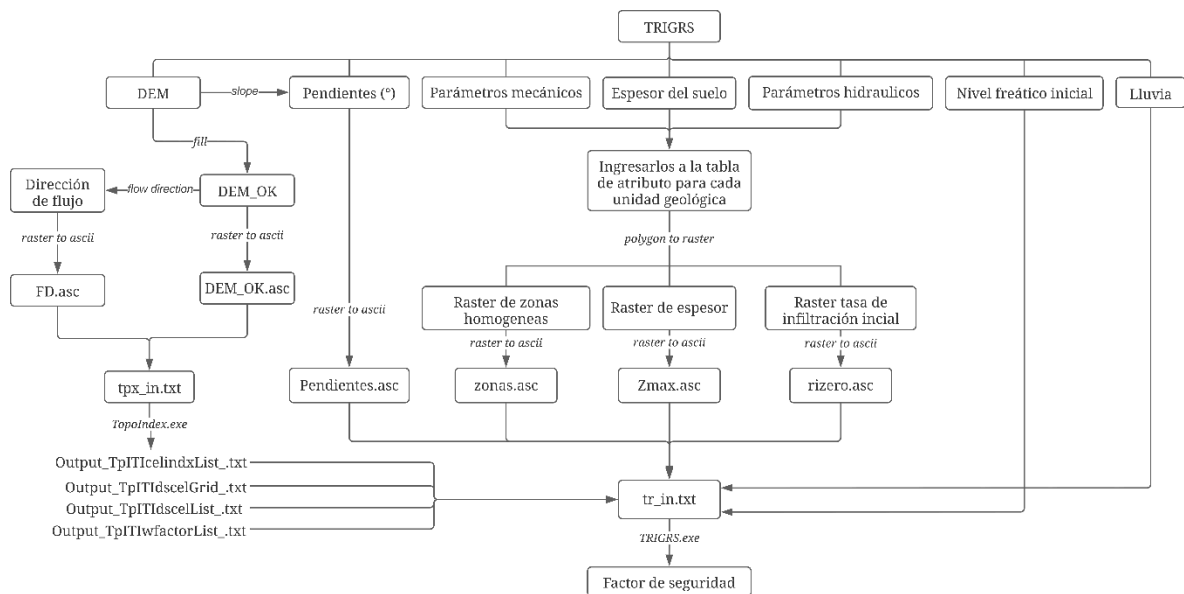
Categoría de pendientes	Porcentaje (%)	Grados (°)
Muy baja	0-3	0-2
Baja	3-10	2-6
Inclinada	10-25	6-14
Muy inclinada	25-40	14-22
Abrupta	40-60	22-31
Muy abrupta	60-100	31-45
Escarpada	>100	>45

Anexo 9. Representación de las condiciones de bordes asumidas en el talud infinito de TRIGRS, bajo un modelo de infiltración saturado con limite basal infinito. Tomado de (Baum et al., 2008).



Anexo 10. Procedimiento para calcular el factor de seguridad en TRIGRS.

A grandes modos TRIGRS opera de la siguiente manera: se tiene un archivo de texto llamado tr_in.txt, donde se ingresan todos los parámetros de entrada. Si estos son rasters, se introduce la ubicación del archivo, por el contrario, simplemente se escriben los datos en el respectivo campo del archivo de texto. Una vez completado el tr_in.txt se guardan los cambios y se ejecuta la aplicación TRIGRS.exe, para obtener los archivos de salida que tienen la distribución del FS. Adicionalmente, con TRIGRS provienen otros programas complementos como UnitConvert, GridMatch y TopoIndex que operan de la misma manera, y que son útiles para realizar conversiones de unidades, verificar la compatibilidad de los archivos de entrada y generar los archivos necesarios para implementar la escorrentía en TRIGRS, respectivamente. El procedimiento para calcular el FS se llevó a cabo de la siguiente manera:

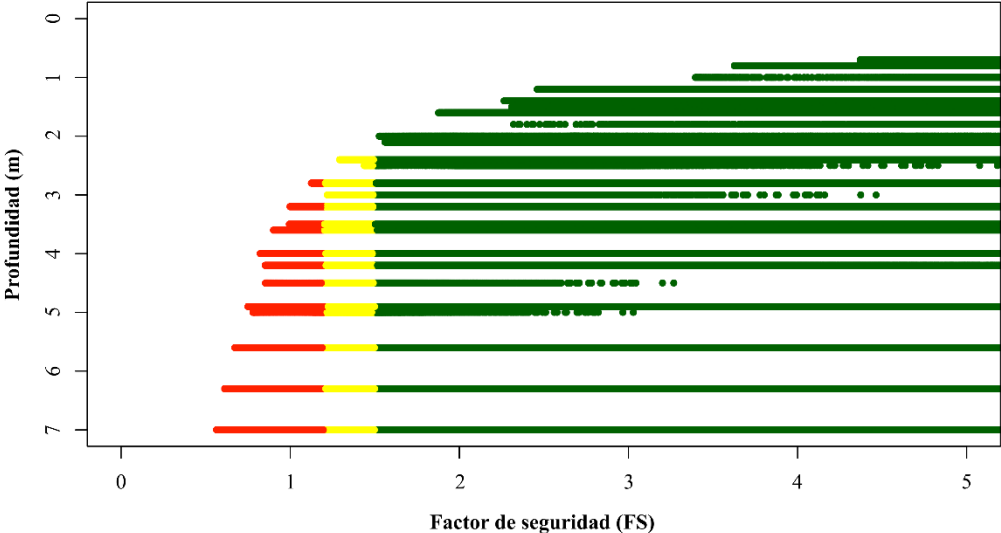


- 1) En ArcMap, se corrigió hidrológicamente el DEM mediante la función *fill*. Al DEM hidrológicamente correcto (DEM_OK) se determinaron las direcciones de flujo (FD) a través de *flow direction*. Tanto el DEM_OK como las FD se convirtieron a formato ascii utilizando la herramienta *raster to ascii*. Posteriormente se llevaron al

programa TopoIndex con el fin de obtener los archivos que indican la dirección de la escorrentía.

- 2) A continuación, se generaron las pendientes en grados a partir del DEM y se convirtieron a formato ascii.
- 3) Seguidamente se ingresaron los parámetros mecánicos, espesor del suelo y parámetros hidráulicos en la tabla de atributos de la geología con el objetivo de definir polígonos que correspondan a zonas homogéneas. Dichos polígonos se convirtieron a formato ascii, al igual que la profundidad del suelo (Zmax) y la infiltración inicial en la zona de estudio (rizero.asc).
- 4) De esta forma, se procedió a diligenciar los parámetros de entradas en el archivo de inicio (tr_in.txt). Los archivos txt generados en TopoIndex en el primer paso, las pendientes, zonas homogéneas, espesor del suelo e infiltración inicial en formato ascii se ingresaron por medio de la ubicación de estos archivos. Mientras que el nivel freático inicial y la lluvia se ingresaron escribiendo en el archivo de texto. Así mismo, los parámetros mecánicos, la conductividad hidráulica, difusividad hidráulica y los parámetros de la curva de retención del agua también se escribieron directamente en tr_in.txt para cada zona homogénea.
- 5) Finalmente, se ejecutó TRIGRS.exe y se obtuvo la distribución del FS.

Anexo 11. Factor de seguridad vs Profundidad en el modelo de TRIGRS.

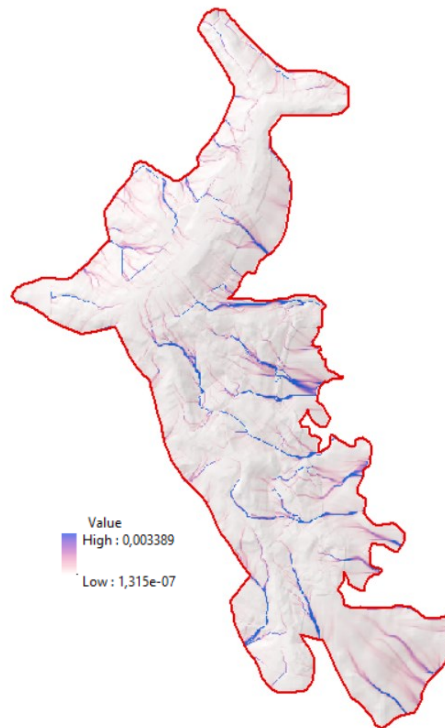


Anexo 12. Resultados hidrológicos del evento de lluvia simulado en TRIGRS.

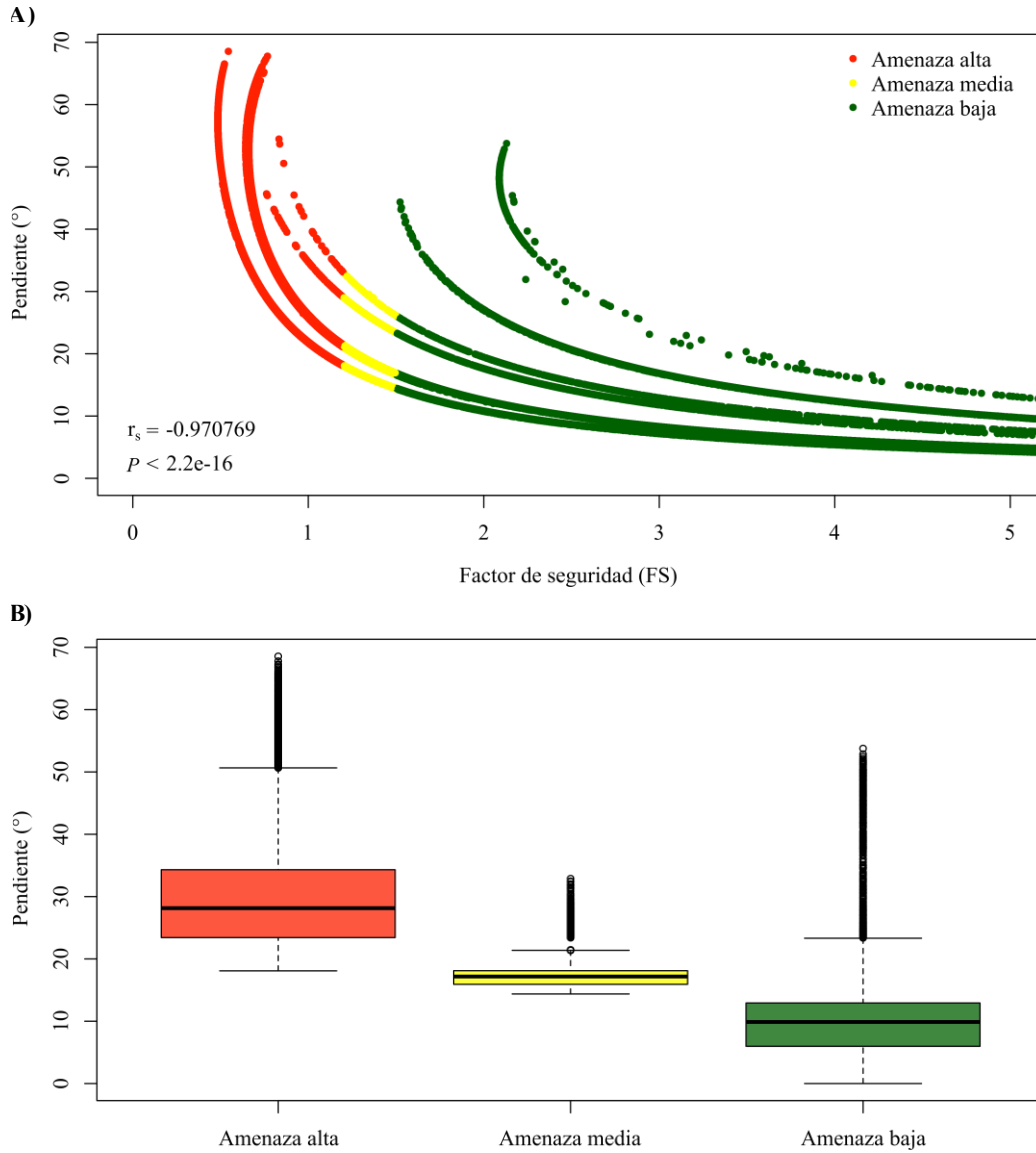
A) Balance de masas en cada periodo de lluvia.

Nº Periodo	Precipitación	Infiltración	Infiltración (%)	Escorrentía	Escorrentía (%)
1	9.374846	4.93722e-04	0.01%	9.37435	99.99%
2	4.303208	4.93722e-04	0.01%	4.30272	99.99%
3	2.920034	4.93722e-04	0.02%	2.91954	99.98%
4	1.844232	4.93722e-04	0.03%	1.84374	99.97%
5	1.029696	4.93722e-04	0.05%	1.02920	99.95%
6	0.860642	4.93722e-04	0.06%	0.86015	99.94%

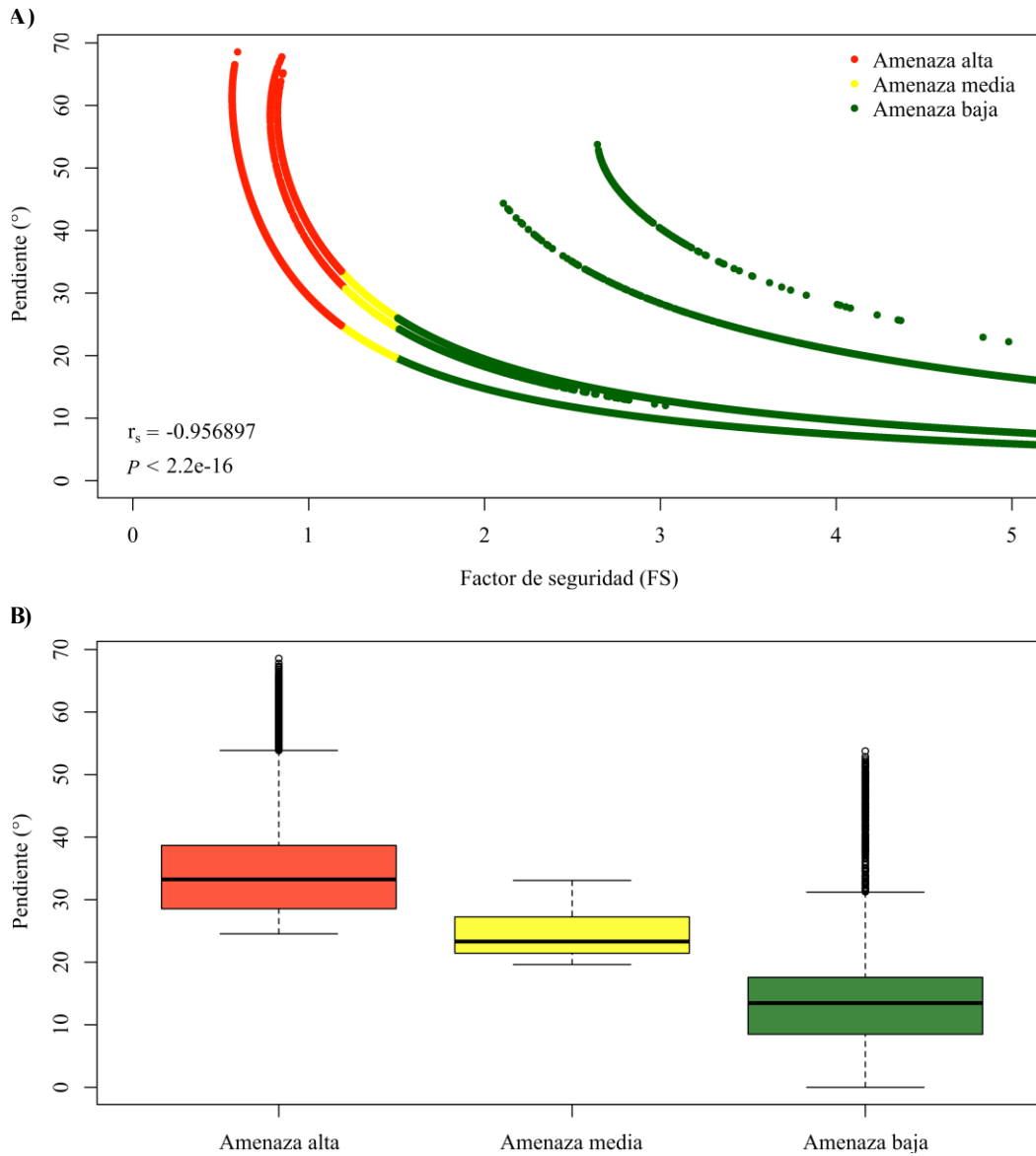
B) Escorrentía generada al final del periodo 6.



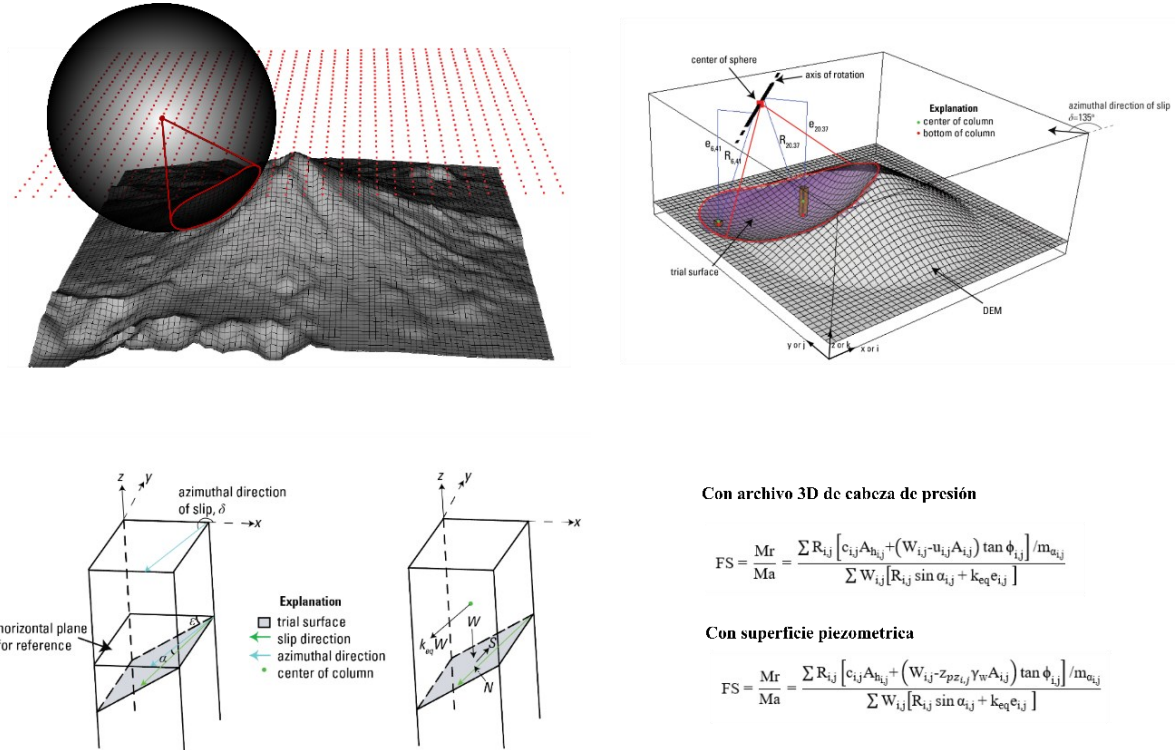
Anexo 13. Relación de la pendiente con el factor de seguridad para el escenario saturado en TRIGRS. (A) Factor de seguridad vs Pendiente. (B) Diagrama de cajas y bigotes de las categorías de Amenaza vs Pendiente.



Anexo 14. Relación de la pendiente con el factor de seguridad para el escenario actual-Tr25 en TRIGRS. (A) Factor de seguridad vs Pendiente. (B) Diagrama de cajas y bigotes de las categorías de Amenaza vs Pendiente.



Anexo 15. Representación del modelo de columnas utilizado en Scoops3D. Tomada y modificada de Reid et al. (2015).



Con archivo 3D de cabeza de presión

$$FS = \frac{Mr}{Ma} = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{h_{i,j}} + (W_{i,j} - u_{i,j}) A_{i,j} \tan \phi_{i,j}] / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{eq} e_{i,j}]}$$

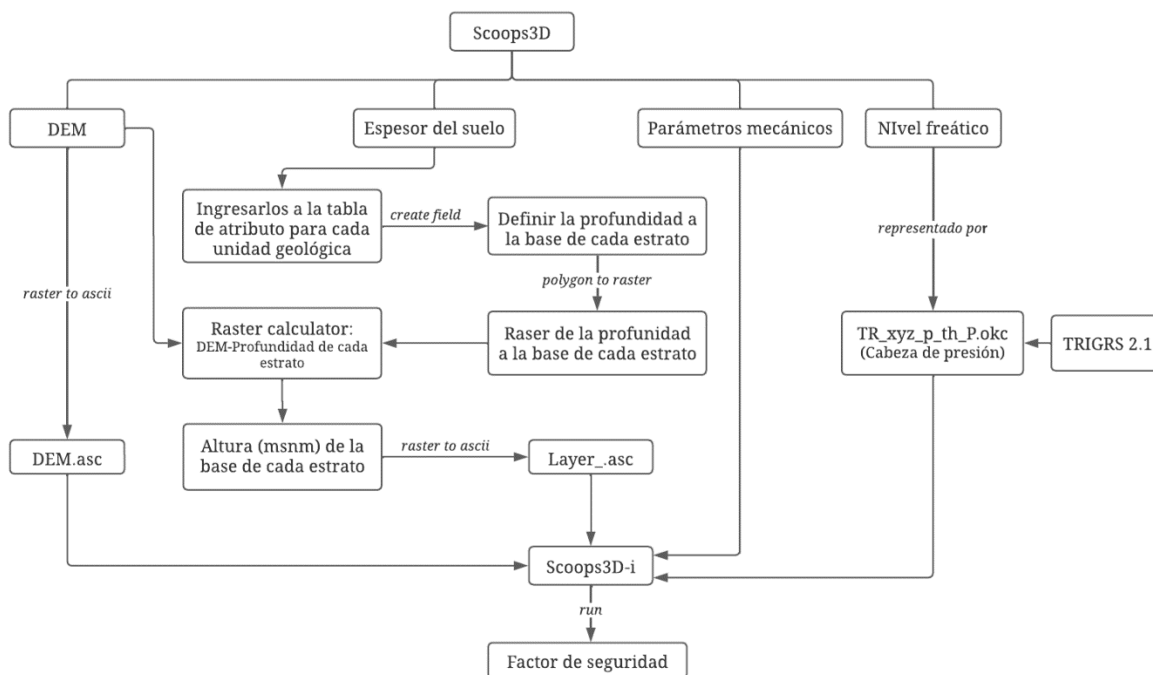
Con superficie piezométrica

$$FS = \frac{Mr}{Ma} = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{h_{i,j}} + (W_{i,j} - z_{pz_{i,j}} \gamma_w A_{i,j}) \tan \phi_{i,j}] / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{eq} e_{i,j}]}$$

Donde $R_{i,j}$ y $\alpha_{i,j}$ son la distancia desde el centro del eje de rotación a la base de cada columna y el buzamiento aparente en la dirección promedio del deslizamiento, respectivamente. $c_{i,j}$ cohesión, $\phi_{i,j}$ ángulo de fricción, k_{eq} el coeficiente de aceleración sísmica (que en este caso es cero), $A_{h_{i,j}}$ el área horizontal en la base de la columna, $W_{i,j}$ el peso de la columna, $u_{i,j}$ la presión de poros ($u = h\gamma_w$) donde h es la cabeza de presión y γ_w el peso unitario del agua, $z_{pz_{i,j}}$ es la profundidad vertical debajo de la superficie piezométrica, $m_{\alpha_{i,j}}$ esta dado por $\cos \varepsilon_{i,j} + (\sin \alpha_{i,j} \tan \phi_{i,j} \sin \alpha_{i,j}) / FS$, donde ε es el buzamiento real de la superficie de prueba.

Anexo 16. Procedimiento para implementar el modelo de amenaza de Scoops3D

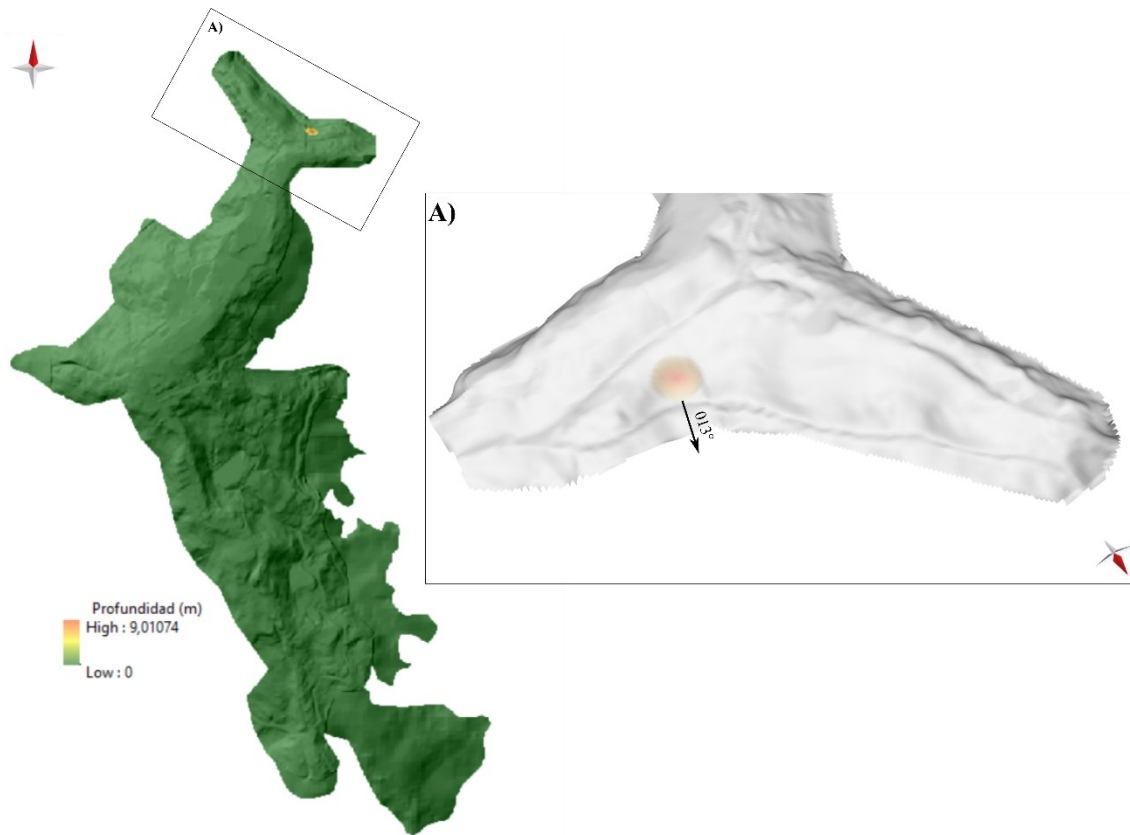
El procedimiento para ejecutar el modelo de amenaza Scoops3D se presenta a continuación:



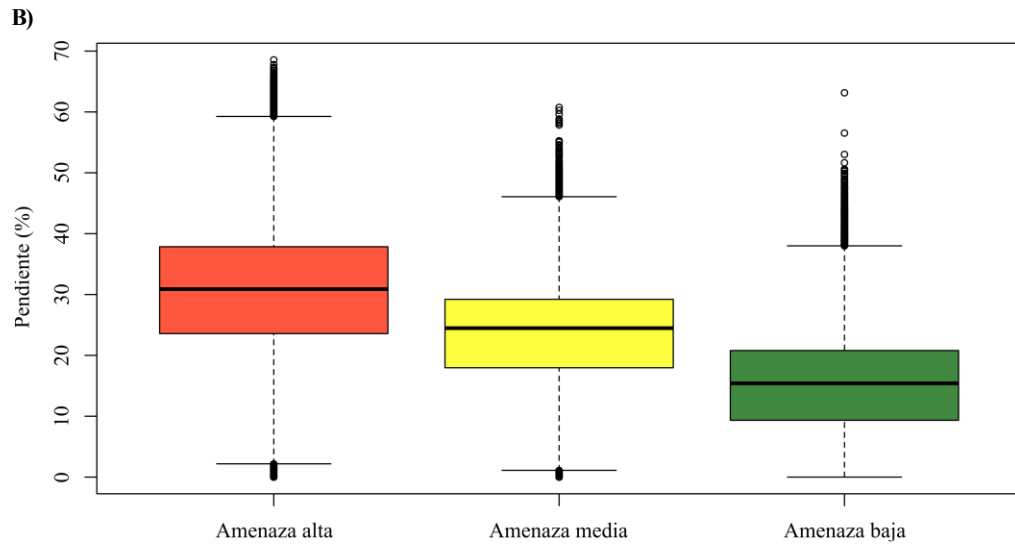
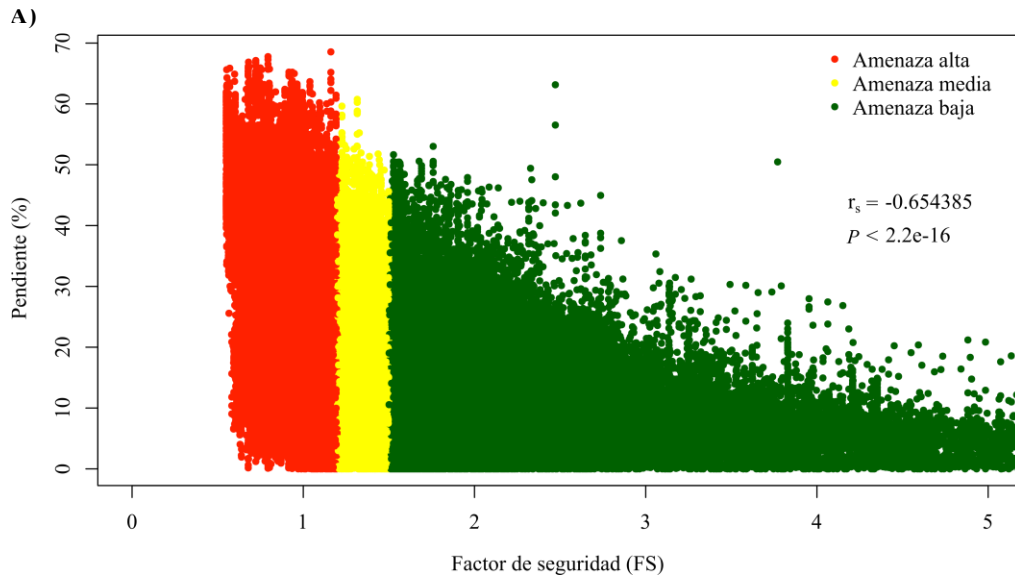
- 1) En primer lugar, el modelo de elevación digital del terreno (DEM) se convirtió a formato ascii mediante la herramienta *raster to ascii*.
- 2) Posteriormente en ArcMap, se ingresaron los espesores de cada unidad geológica en la tabla de atributos de la geología. Seguido se creó otro campo donde se determinó la profundidad de la base de cada estrato, con el fin de convertirlo a raster. De esta forma, en *raster calculator*, se restó el DEM con el anterior raster para obtener la altura sobre el nivel del mar de la base de cada estrato. Finalmente, estas se pasaron a formato ascii para cada unidad geológica.
- 3) El archivo de con la distribución de las cabezas de presión fue editado y adaptado al formato que Scoops3D exige.
- 4) En el programa Scoops3D-i, se ingresaron los archivos del DEM, cabezas de presión y cada uno de los estratos. Para cada capa, fue necesario escribir sus respectivos parámetros mecánicos (cohesión, peso unitario y ángulo de fricción). Por otro lado, se construyó la malla de nodos y se determinó el tamaño máximo de

las superficies potenciales de fallas. Finalmente, en la pestaña *run*, se ejecuta el programa para obtener el mapa con la distribución de los FS. Para el escenario saturado, el modelo de elevación digital (DEM) fue utilizado para definir el nivel freático como una superficie piezométrica.

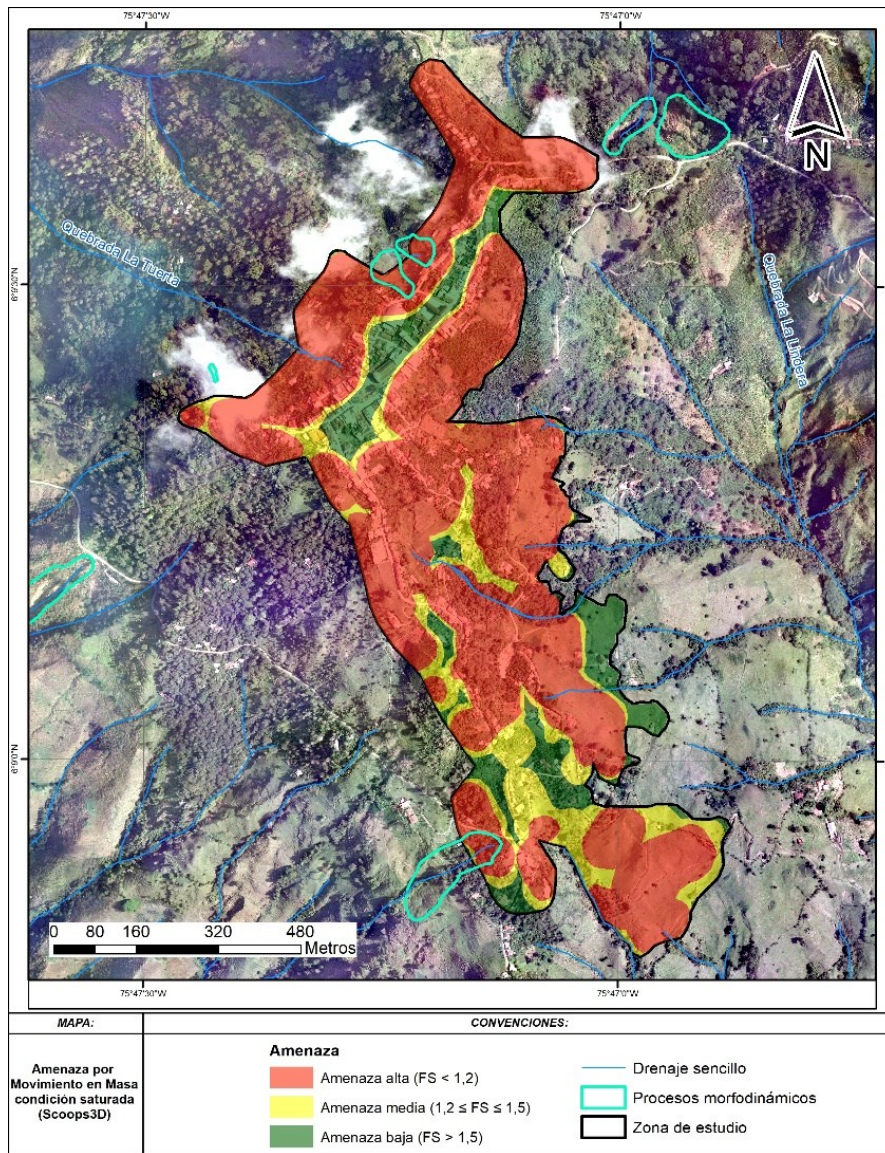
Anexo 17. Superficie de falla crítica modelada en el escenario saturado de Scoops3D



Anexo 18. Relación de la pendiente con el factor de seguridad para el escenario saturado en Scoops3D. (A) Factor de seguridad vs Pendiente. (B) Diagrama de cajas y bigotes de las categorías de Amenaza vs Pendiente.



Anexo 19. Mapa de amenaza por movimiento en masa para el escenario saturado de Scoops3D obtenido en (Corplanes, 2022).



Anexo 20. Profundidades de falla con $FS < 1.5$ para el escenario saturado de Scoops3D.

