ISSN: 2806-5697
Vol. 7 – Núm. E2 / 2026

Estabilidad de talud bajo diferentes condiciones de lluvia

Slope stability under different rainfall conditions

Estabilidade de taludes sob diferentes condições de precipitação

Verdecia Quintana William[1]
Universidad de Guayaquil
william.verdeciaquin@ug.edu.ec
https://orcid.org/0009-0003-1357-2075

Quintana Suárez Belkys[2]
Universidad de Guayaquil
belkys.quintanas@ug.edu.ec
https://orcid.org/0000-0001-6518-0645

DOI / URL: https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v7/nE2/1685

Como citar:
Verdecia Quintana, W. & Quintana Suárez, B. (2026). Estabilidad de talud bajo diferentes condiciones de lluvia. Código Científico Revista de Investigación, 7(E2), 1092-1108.

***Recibido**: 15/07/2026* ***Aceptado**: 18/08/2026* ***Publicado**: 30/09/2026*

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de la lluvia persistente en la estabilidad de un talud de suelo residual representativo de la Sierra ecuatoriana. Se construyó un modelo bidimensional de tres regiones (suelo residual, saprolita y roca sana) en GeoStudio y se simularon escenarios estacionarios de saturación superficial progresiva (cara del talud; cara más cresta; superficie completa con nivel freático elevado) mediante el acople de los módulos SEEP/W y SLOPE/W con el método de Morgenstern-Price. En condición seca el factor de seguridad fue 1.87; bajo los escenarios de lluvia descendió a valores entre 1.265 y 1.269, una reducción del 32 %, por debajo del umbral normativo de 1.50. Los campos de presión de poros evidenciaron un nivel freático colgado sobre la saprolita, cuyo efecto barrera controla el mecanismo de falla somero apoyado en el contacto suelo–roca. La estabilidad resultó insensible al área saturada adicional y a la elevación del freático regional, lo que confirma que la saturación de la cara del talud es el factor dominante. Se concluye que el talud a 45° pierde su margen de seguridad bajo el invierno andino persistente, por lo que se recomienda drenaje superficial y medidas de estabilización; el enfoque estacionario empleado constituye una alternativa conservadora válida ante restricciones de análisis transitorio.

Palabras clave: estabilidad de taludes, equilibrio límite, infiltración, succión matricial, suelos residuales.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the influence of persistent rainfall on the stability of a residual soil slope representative of the Ecuadorian Andes. A two-dimensional three-region model (residual soil, saprolite, and bedrock) was built in GeoStudio, and steady-state progressive surface saturation scenarios (slope face; slope face plus crest; full surface with raised water table) were simulated by coupling SEEP/W and SLOPE/W with the Morgenstern-Price method. Under dry conditions the factor of safety was 1.87; under rainfall scenarios it decreased to values between 1.265 and 1.269, a 32 % reduction, below the regulatory threshold of 1.50. Pore-water pressure fields evidenced a perched water table above the saprolite, whose barrier effect controls the shallow failure mechanism resting on the soil–rock contact. Stability proved insensitive to additional saturated area and to regional water-table rise, confirming that slope-face saturation is the dominant factor. It is concluded that the 45° slope loses its safety margin under persistent Andean wet-season rainfall, so surface drainage and stabilization measures are recommended; the steady-state approach used constitutes a valid conservative alternative when transient analysis is restricted.

Keywords: slope stability, limit equilibrium, infiltration, matric suction, residual soils.

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência de chuvas persistentes na estabilidade de uma encosta de solo residual representativa da Serra Equatoriana. Um modelo bidimensional composto por três regiões (solo residual, saprolito e rocha sã) foi construído no GeoStudio, e cenários de regime permanente com saturação superficial progressiva (face da encosta; face e crista; superfície total com elevação do nível freático) foram simulados mediante o

acoplamento dos módulos SEEP/W e SLOPE/W, utilizando o método de Morgenstern-Price. Em condições secas, o fator de segurança era de 1,87; sob os cenários de chuva, esse valor caiu para a faixa entre 1,265 e 1,269 — uma redução de 32% —, situando-se abaixo do limite normativo de 1,50. Os campos de pressão neutra revelaram a presença de um nível freático suspenso acima do saprolito; o efeito de barreira deste último governa o mecanismo de ruptura superficial que ocorre na interface solo-rocha. A estabilidade mostrou-se insensível a áreas saturadas adicionais ou à elevação do nível freático regional, confirmando que a saturação da face da encosta é o fator dominante. Conclui-se que a encosta com inclinação de 45° perde sua margem de segurança durante a persistente estação chuvosa andina; portanto, recomendam-se medidas de drenagem superficial e estabilização. A abordagem de regime permanente empregada constitui uma alternativa válida e conservadora quando a análise em regime transitório é inviável.

Palavras-chave: estabilidade de taludes, equilíbrio-limite, infiltração, sucção matricial, solos residuais.

Introducción

La inestabilidad de taludes constituye uno de los procesos geológicos más destructivos a nivel mundial, con consecuencias directas sobre la infraestructura vial, los asentamientos humanos y la actividad productiva. Según Petley (2012), entre 2004 y 2010 se registraron más de 2 600 eventos de deslizamiento con víctimas fatales en el mundo, siendo las precipitaciones intensas el principal detonante hidrometeorológico. En regiones tropicales y subtropicales, donde los regímenes pluviométricos presentan alta variabilidad estacional y eventos extremos cada vez más frecuentes asociados al cambio climático, la problemática se agrava de manera significativa (Gariano y Guzzetti, 2016).

Ecuador, por su ubicación geográfica, relieve andino, litología diversa y régimen de lluvias bimodal en la Sierra y monomodal en la Costa, es particularmente vulnerable a los movimientos en masa. El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) ha documentado incrementos sostenidos en la intensidad de precipitaciones en la vertiente occidental de los Andes y en la cuenca del río Guayas durante la última década (INAMHI, 2023). Eventos como los deslizamientos de Alausí (2023) y los colapsos recurrentes en la vía Baños–Puyo evidencian la necesidad urgente de herramientas cuantitativas para evaluar la

estabilidad de taludes bajo escenarios pluviométricos realistas (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2023).

Desde el punto de vista geotécnico, los suelos residuales de origen volcánico y laterítico que predominan en la Sierra y la Costa ecuatorianas presentan un comportamiento hidromecánico complejo: alta porosidad inicial, estructura metaestable, curvas de retención de agua con fuerte histéresis y una marcada sensibilidad a la succión matricial (Bishop, 1959; Rahardjo et al., 2007; Satyanaga et al., 2013). La infiltración de agua de lluvia reduce la succión no saturada, incrementa las presiones de poros y, en consecuencia, disminuye la resistencia al corte disponible, lo que puede llevar el factor de seguridad (FS) por debajo de la unidad (Ng y Shi, 1998; Fredlund y Rahardjo, 1993).

La modelación numérica acoplada de infiltración y estabilidad ha demostrado ser una herramienta eficaz para cuantificar estos efectos. El software GeoStudio, mediante la integración de los módulos SEEP/W (análisis de flujo transitorio en medios saturados y no saturados) y SLOPE/W (análisis de estabilidad por equilibrio límite), permite simular la evolución temporal de las presiones de poros bajo diferentes hietogramas de lluvia y calcular el FS en cada instante (GEO-SLOPE International, 2021). Diversos autores han empleado esta metodología: Rahimi et al. (2011) analizaron taludes residuales en Malasia bajo tormentas de distinta duración; Muntohar y Liao (2010) evaluaron la influencia de la permeabilidad superficial en taludes tropicales; y Oh y Vanapalli (2013) compararon respuestas hidromecánicas para diferentes condiciones iniciales de saturación. Más recientemente, Li et al. (2022) y Chen et al. (2024) incorporaron escenarios de cambio climático en la evaluación de estabilidad, aunque con parámetros de suelos templados que no son directamente extrapolables a suelos residuales tropicales.

En el contexto ecuatoriano, los estudios numéricos de estabilidad de taludes ante lluvia son aún escasos. Los trabajos existentes se limitan, en su mayoría, a análisis estáticos bajo

condición saturada o a evaluaciones cualitativas de susceptibilidad (Cárdenas et al., 2020; Villacís y Suárez, 2021). No se ha encontrado, en la literatura revisada, un estudio sistemático que combine modelación transitoria de infiltración con análisis de estabilidad para suelos residuales representativos del territorio ecuatoriano, considerando simultáneamente la variación de intensidad pluviométrica, permeabilidad del suelo y condición inicial de saturación.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la influencia de la intensidad y duración de la precipitación en la estabilidad de un talud de suelo residual tropical, representativo de la formación geológica de la Sierra centro-sur del Ecuador, mediante modelación numérica acoplada SEEP/W–SLOPE/W. Específicamente, se pretende: (i) caracterizar la respuesta hidromecánica del talud frente a lluvias de baja, media y alta intensidad; (ii) analizar el efecto de la permeabilidad saturada y la condición inicial de saturación sobre la evolución de las presiones de poros; y (iii) cuantificar la variación del factor de seguridad desde la condición seca hasta el estado posterior a la precipitación.

La metodología se fundamenta en la resolución numérica de la ecuación de flujo transitorio en medio no saturado (SEEP/W) acoplada al método de equilibrio límite de Morgenstern-Price (SLOPE/W), implementada en GeoStudio bajo las restricciones de la licencia académica (geometría simplificada de talud bidimensional, malla de elementos finitos limitada y hietogramas sintéticos calibrados con registros pluviométricos del INAMHI). Se comparan cuatro escenarios de lluvia, tres valores de permeabilidad y dos condiciones iniciales de saturación, generando matrices de FS que permiten identificar combinaciones críticas.

Los resultados esperados comprenden campos temporales de succión matricial y presión de poros, curvas de variación del FS frente al tiempo para cada escenario, y un mapa comparativo de reducción porcentual del FS respecto a la condición seca. Se anticipa que las combinaciones de alta intensidad con baja permeabilidad y alta saturación inicial producirán

las mayores reducciones del FS, con valores que podrían situarse por debajo del umbral normativo de 1,50 exigido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015, Capítulo Geotecnia).

Metodología

Tipo y diseño de investigación

El estudio corresponde a un enfoque cuantitativo con diseño cuasi-experimental de tipo numérico-determinístico y carácter paramétrico. La secuencia de análisis inició con la verificación de estabilidad por equilibrio límite bajo condición inicial seca, continuó con la modelación de filtración saturada/no saturada en régimen permanente para cada escenario de lluvia, y finalizó con análisis de estabilidad acoplados que incorporan los campos de presión de poros calculados por la filtración (GEO-SLOPE International, 2021). Dado que la licencia académica empleada restringe el análisis transitorio, la severidad pluviométrica se representó mediante escenarios estacionarios de saturación superficial progresiva, equivalentes a lluvia persistente de intensidad baja, media y alta; este enfoque produce una envolvente conservadora del factor de seguridad, consistente con la práctica de evaluación de peor caso en taludes de suelos residuales (Rahardjo et al., 2013).

Población y muestra

El universo de estudio lo constituyen los taludes de cortes viales excavados en suelos residuales de origen volcánico (Andisoles) de la Sierra ecuatoriana. La muestra, seleccionada mediante muestreo no probabilístico intencional, es un perfil estratigráfico bidimensional representativo de 40 m de longitud por 20 m de profundidad, con un corte de 15 m de altura e inclinación de 45° (1H:1V), dividido en tres regiones: suelo residual (≈ 4 m), saprolita (≈ 6 m) y roca sana (≈ 10 m) (ver figura 1). Criterios de inclusión: estratigrafía suelo residual–saprolita–basamento, característica de los perfiles de meteorización andinos, y geometría dentro del

rango típico de cortes viales sin contención. Criterios de exclusión: fallas profundas que atraviesen el basamento, carga sísmica e interacción suelo–estructura.

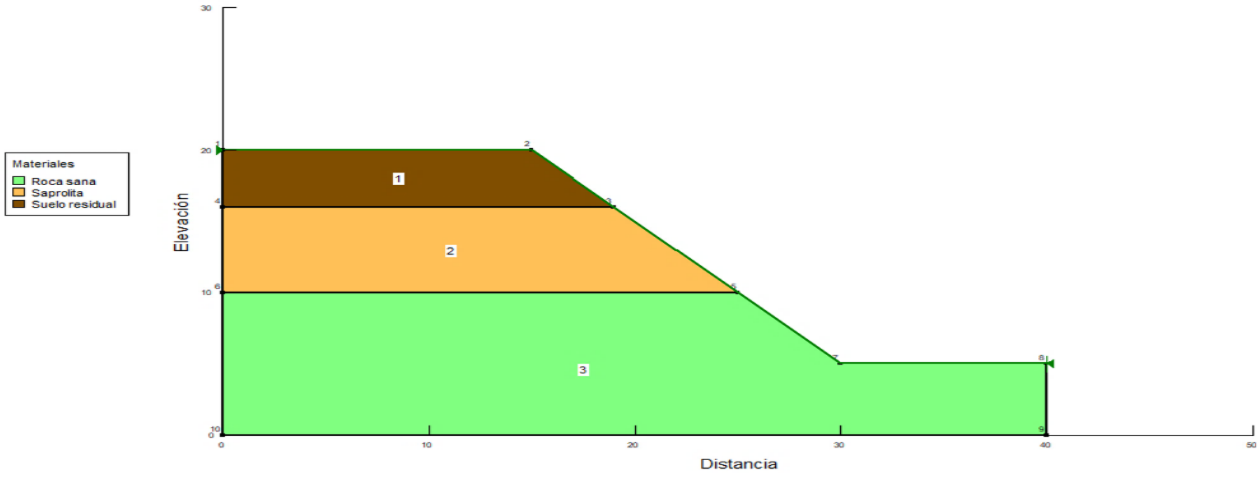

Figura 1: Perfil estratigráfico bidimensional del modelo numérico del talud: Región 1 = suelo residual, Región 2 = saprolita, Región 3 = roca sana (40 m × 20 m; corte de 15 m a 45°).. Elaboración propia

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección y el procesamiento de datos se realizaron con el software GeoStudio (versión académica estudiantil), mediante los módulos SEEP/W y SLOPE/W (GEO-SLOPE International, 2021). Los parámetros mecánicos e hidráulicos de las tres regiones (ver tabla 1) se definieron a partir de valores reportados para suelos residuales andinos (Fredlund & Rahardjo, 1993; Rahardjo et al., 2013); la resistencia al corte se modeló con el criterio de Mohr-Coulomb extendido a suelos no saturados y la retención de agua con el modelo de Van Genuchten (1980). El basamento se modeló como superficie de no penetración para las superficies de falla, confinando el mecanismo de ruptura al manto de suelo residual–saprolita, coherente con los deslizamientos someros de la región.

Tabla 1:
Parámetros mecánicos e hidráulicos de los materiales del modelo. Elaboración propia

Región	Material	γ húm (kN/m³)	γ sat (kN/m³)	c' (kPa)	φ' (°)	φᵇ (°)	k_sat (m/s)	θs / θr	α (kPa⁻¹)	n
1	Suelo Residual	15.5	17.5	8	30	15	1×10^{-5}	0.60 / 0.10	0.02	1.8
2	Saprolita	18.5	20.5	20	35	17	1×10^{-7}	0.35 / 0.05	0.01	1.6
3	Roca Sana	24.0	24.5	1000	45	–	1×10^{-9}	0.05 / 0.01	0.001	1.2

Escenarios de lluvia

La condición de línea base se evaluó con nivel freático profundo definido mediante línea piezométrica en el contacto saprolita–roca. Los escenarios de lluvia se diferenciaron por el área de superficie saturada (presión de poros nula en la superficie expuesta) y por la carga hidráulica regional impuesta en los bordes (ver tabla 2).

Tabla 2:
Condiciones de frontera por escenario de saturación persistente. Elaboración propia

Escenario	Superficie saturada (u = 0)	Carga lateral izq. / der. (m)
Seco (línea base)	– (piezométrica profunda)	10 / 5
A – Baja	Cara del talud	10 / 5
B – Media	Cara del talud + cresta	10 / 5
C – Alta	Toda la superficie (cresta, cara y berma)	13 / 7

Técnica de análisis de datos

El factor de seguridad inicial se calculó por el método de equilibrio límite de Morgenstern-Price (Morgenstern y Price, 1965) con función inter-dovelas medio-seno, mediante búsqueda automática de superficies circulares (rejilla de centros entre las coordenadas (12, 20) y (26, 30) m, incrementos de 2 m y radios entre 4 y 12 m, ≈ 100 superficies de ensayo). El flujo en régimen permanente se rige por la ecuación de Richards:

$\partial/\partial x\ (k_x\ \partial h/\partial x) + \partial/\partial y\ (k_y\ \partial h/\partial y) + q = \partial\theta/\partial t$ (1)

La resistencia al corte en condición no saturada se calculó con la ecuación extendida de Fredlund:

$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b$ (2)

El factor de seguridad se define como la relación entre esfuerzos resistentes y movilizadores a lo largo de la superficie de falla:

$FS = \Sigma R / \Sigma D$ (3)

y la retención de agua sigue el modelo de Van Genuchten:

$$\theta(\psi) = \theta r + (\theta s - \theta r) / [1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^m \quad (4)$$

Las presiones de poros calculadas por SEEP/W se transfirieron a análisis SLOPE/W sucesivos mediante acople padre–hijo, garantizando coherencia hidrodinámica entre ambos módulos. El FS mínimo de cada escenario se comparó con el umbral de 1.50 exigido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015, capítulo geotécnico) y se cuantificó su reducción porcentual respecto a la condición seca.

Resultados

En condición inicial seca, el talud presentó un FS de 1.87 (ver figura 2), con una superficie crítica somera que atraviesa el manto de suelo residual–saprolita y se apoya en el contacto suelo–roca, confirmando que el nivel freático regional profundo no controla la estabilidad. Bajo los escenarios de saturación superficial persistente, el FS descendió a valores entre 1.265 y 1.269 (ver tabla 3; figuras 3–8), es decir, una reducción del 32 % que sitúa al talud por debajo del umbral de 1.50 exigido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015), aunque por encima de la falla total (FS = 1.0).

Tabla 1:
Factor de seguridad mínimo por escenario de saturación superficial persistente

Escenario	**Superficie saturada (Zero Pressure)**	**Heads izq/der (m)**	**FS mínimo**	**Variación vs. seco**	**Estado vs. NEC-2015 (FS ≥ 1.50)**
Seco	–	10 / 5	1.87	–	Estable (cumple)
A – Baja	Cara del talud	10 / 5	1.269	−32.1 %	Bajo umbral
B – Media	Cara + cresta	10 / 5	1.265	−32.4 %	Bajo umbral
C – Alta	Toda la superficie	13 / 7	1.265	−32.4 %	Bajo umbral

Los campos de presiones de poros (ver figuras 3 y 6) evidencian la formación de un nivel freático colgado sobre la saprolita, producto de su baja permeabilidad relativa (efecto barrera), mecanismo consistente con lo reportado para suelos residuales tropicales (Fredlund

& Rahardjo, 1993; Rahardjo et al., 2013). Este bulbo saturado intercepta la superficie crítica somera y explica la pérdida de margen de seguridad.

Un hallazgo relevante es la insensibilidad del FS al área saturada adicional: los escenarios A, B y C produjeron valores prácticamente idénticos (1.269 → 1.265). Una vez saturada la cara del talud, el sistema alcanza un estado límite controlado por la interfaz suelo–saprolita; la saturación de la cresta o la berma y la elevación del freático regional aportan poco a la desestabilización. Esto indica que las medidas de mitigación deben priorizar el drenaje de la cara del talud y el control del agua colgada (drenes californianos, subdrenes horizontales o llaves de drenaje) sobre intervenciones en la cresta.

Desde el punto de vista normativo, el corte vial a 45° es adecuado en estación seca, pero pierde su margen de seguridad durante el invierno andino persistente, por lo que su diseño debería incorporar drenaje superficial e, idealmente, geometría más tendida o refuerzo. Como limitación, el enfoque estacionario empleado representa el peor caso de lluvia sostenida y no reproduce tormentas cortas; estudios futuros con análisis transitorio y validación de campo podrán refinar los umbrales de intensidad-duración.

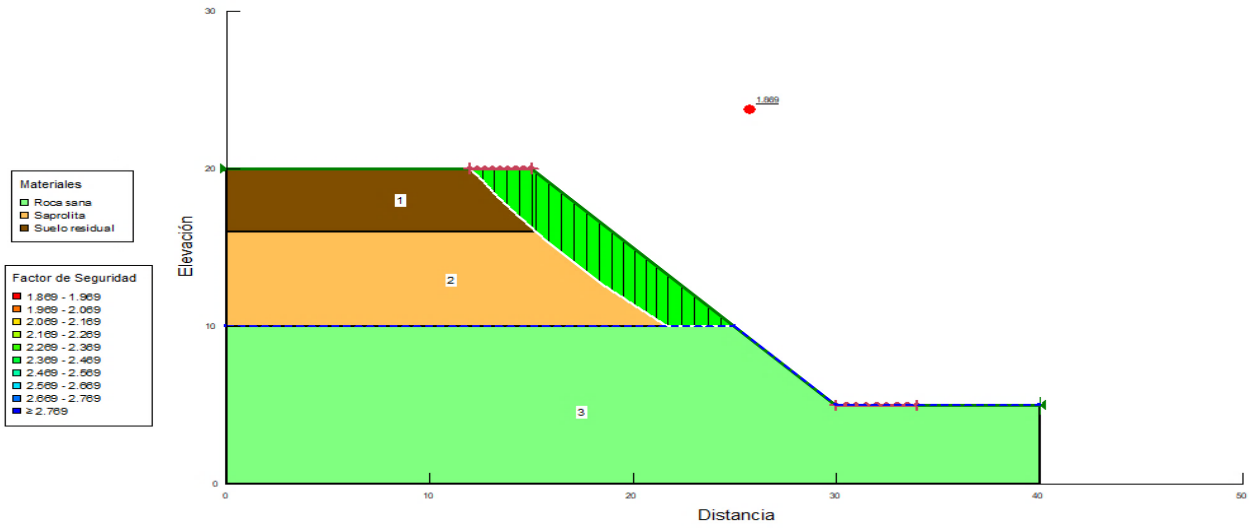

Figura 2: Superficie de falla crítica y factor de seguridad en condición inicial seca con nivel freático profundo (FS = 1.87).. Elaboración propia

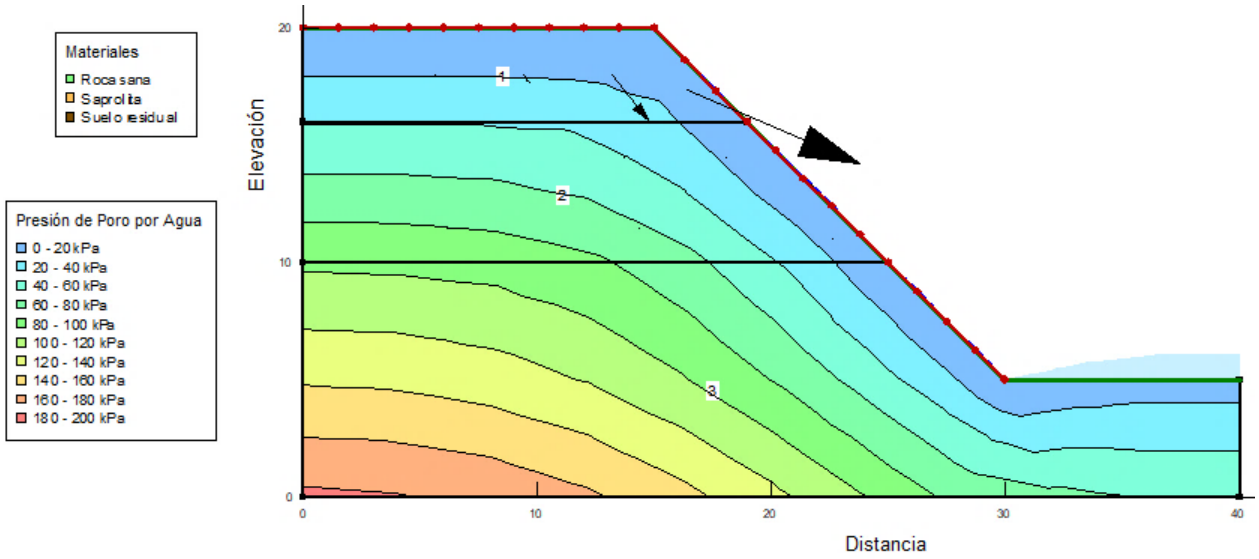

Figura 3: Campo de presiones de poros en régimen permanente para el Escenario A (lluvia baja: saturación de la cara del talud). Elaboración propia

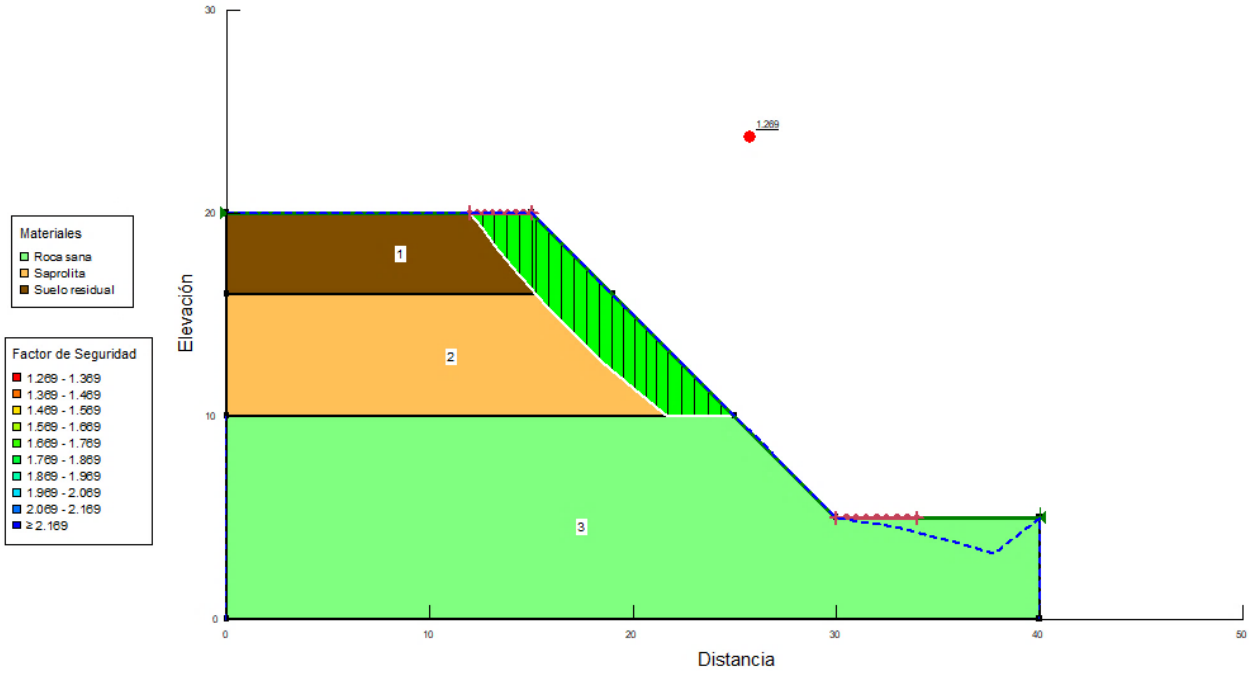

Figura 4: Superficie de falla crítica y factor de seguridad para el Escenario A (FS = 1.269). Elaboración propia

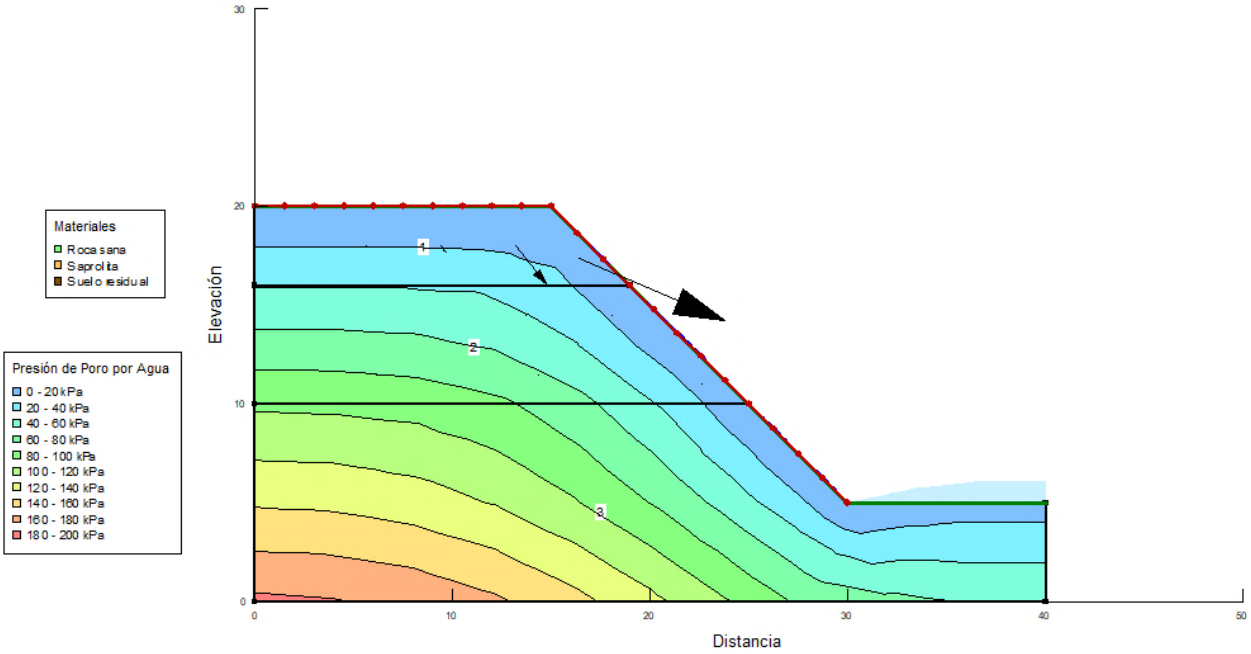

Figura 5: Campo de presiones de poros en régimen permanente para el Escenario B (lluvia media: cara del talud y cresta saturadas).. Elaboración propia

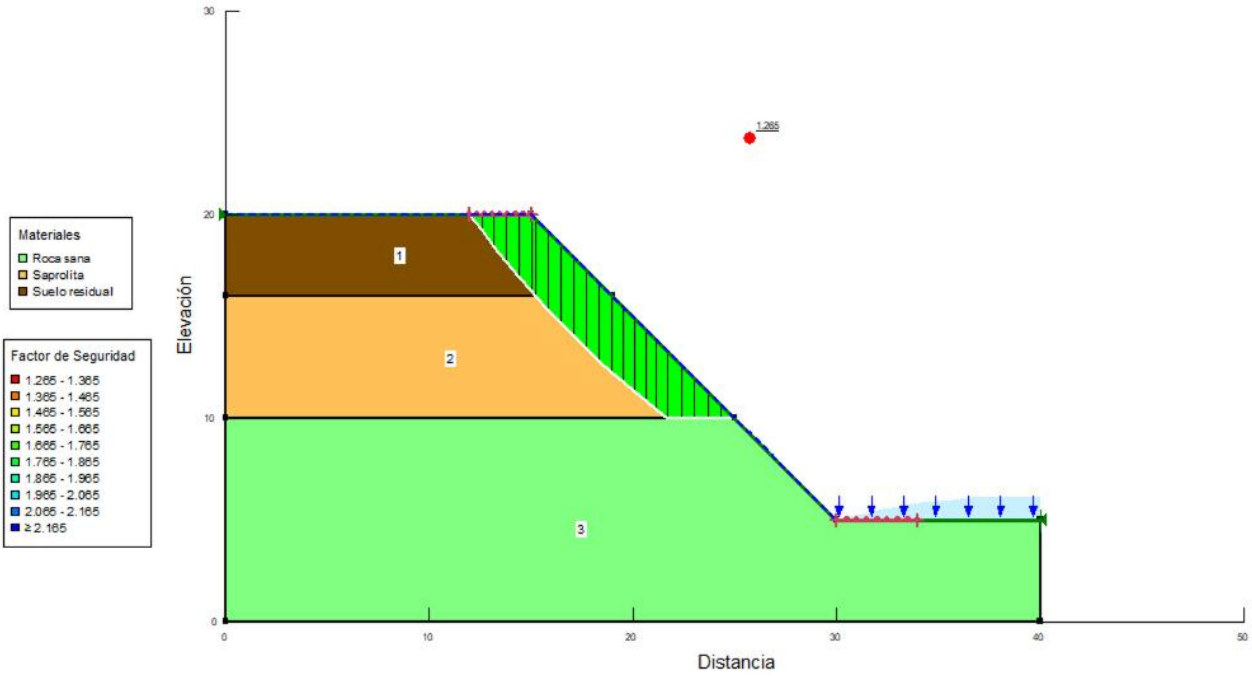

Figura 6: Superficie de falla crítica y factor de seguridad para el Escenario B (FS = 1.265). Elaboración propia

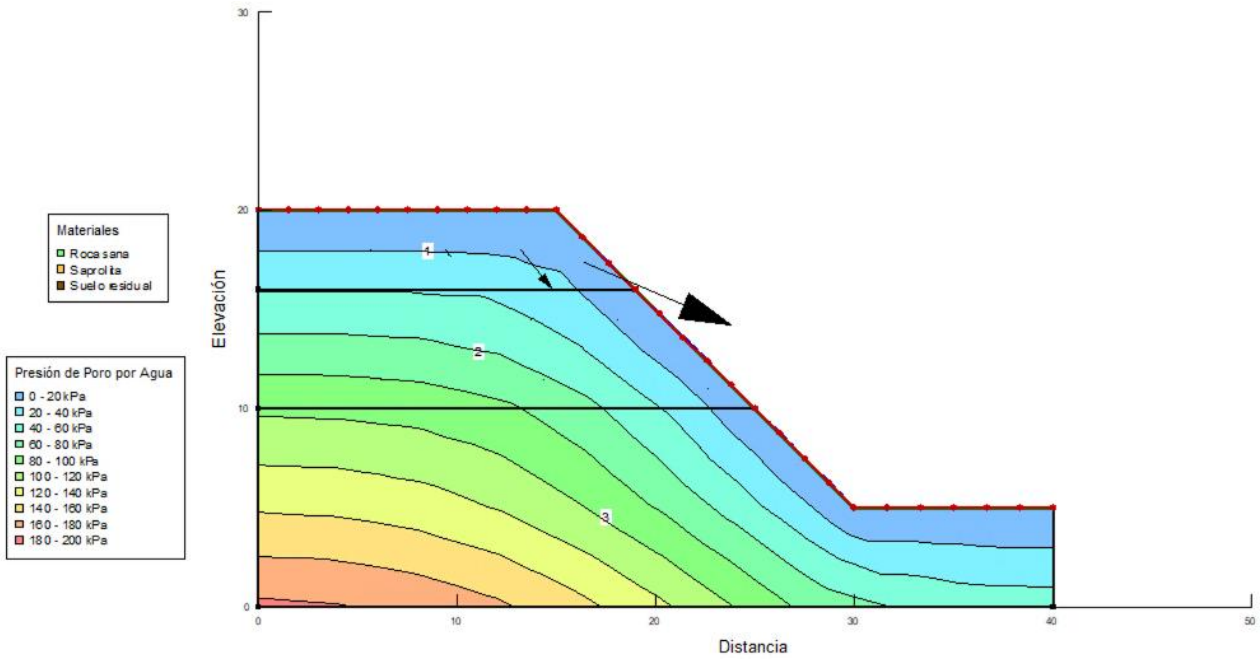

Figura 7: Campo de presiones de poros en régimen permanente para el Escenario C (lluvia alta: superficie completa saturada y nivel freático regional elevado). Elaboración propia

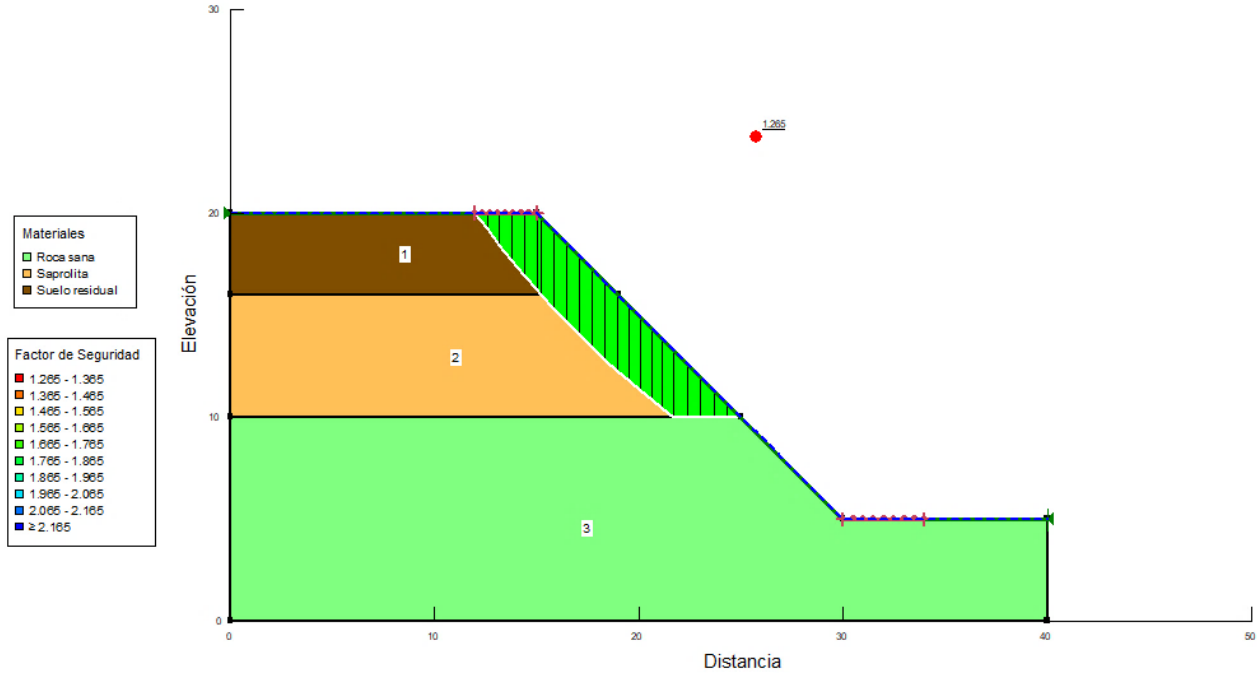

Figura 8: Superficie de falla crítica y factor de seguridad para el Escenario C (FS = 1.265). Elaboración propia

Discusión

La reducción del 32 % en el factor de seguridad y la formación de un nivel freático colgado sobre la saprolita (figuras 3, 5 y 7) confirman que el efecto barrera del horizonte de baja permeabilidad es el control hidrodinámico dominante de la estabilidad del talud analizado.

Este mecanismo, descrito para suelos no saturados por Fredlund y Rahardjo (1993) y analizado numéricamente por Zhang et al. (2004), ha sido corroborado en taludes instrumentados en suelos residuales, donde las fallas por lluvia ocurren con niveles freáticos regionales profundos (Rahardjo et al., 2005). La superficie crítica somera obtenida en todos los escenarios, apoyada en el contacto suelo–roca (figuras 2, 4, 6 y 8), reproduce el modo de falla típico de deslizamientos inducidos por lluvia en suelos residuales tropicales (Cho & Lee, 2001; Collins y Znidarcic, 2004; Ng & Shi, 1998) y explica por qué el freático regional no controla la estabilidad: el mecanismo motor es la infiltración, no el flujo regional.

Un resultado menos frecuente en la literatura es la insensibilidad del FS al incremento del área saturada y a la elevación del freático regional (tabla 3). La similitud de valores entre los escenarios A, B y C (1.269 → 1.265) indica que, una vez saturada la cara del talud, el sistema alcanza un estado asintótico de succión mínima en el que aportes adicionales desde la cresta o la berma resultan marginales. Esto es consistente con Rahimi et al. (2011), quienes identificaron la infiltración sostenida y la lluvia antecedente como los factores que controlan la velocidad de reducción del FS, y con Muntohar y Liao (2010), que destacaron el papel de la permeabilidad superficial en la iniciación de fallas someras. En términos prácticos, ello implica que las medidas de mitigación deben concentrarse en la cara del talud (subdrenes horizontales, llaves de drenaje, cunetas interceptoras) antes que en intervenciones en la cresta, optimizando la inversión en estabilización de cortes viales.

Desde el punto de vista de la resistencia, la condición de presión de poros nula en la superficie expuesta representa la pérdida completa de la succión matricial en la zona de infiltración, es decir, la eliminación del aporte adicional descrito por la formulación extendida de resistencia al corte (Bishop, 1959; Fredlund et al., 1978). Que el FS permanezca por encima de 1.0 en todos los escenarios indica que la cohesión y la fricción efectivas del suelo residual y la saprolita aún aportan una reserva de resistencia; sin embargo, dicha reserva queda por

debajo del margen normativo (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015), lo que en la práctica se traduce en un talud condicionalmente inestable durante el invierno andino. Este hallazgo es coherente con las fallas recurrentes observadas en cortes viales ecuatorianos tras estaciones húmedas persistentes y con la tendencia global de incremento de deslizamientos por lluvia asociada a la variabilidad climática (Gariano y Guzzetti, 2016).

Finalmente, deben reconocerse las limitaciones del estudio. El enfoque estacionario representa la envolvente de peor caso de lluvia sostenida y no reproduce la dinámica de tormentas cortas ni la evolución temporal de las succiones (Satyanaga et al., 2013; Tsai y Yang, 2006); la modelación bidimensional desprecia efectos tridimensionales de flujo y falla (Godt et al., 2009); y los parámetros fueron tomados de la literatura para suelos residuales análogos, sin validación de sitio. Investigaciones futuras deberán incorporar análisis transitorios con hietogramas calibrados a registros locales, modelos tridimensionales y datos de monitoreo de campo para definir umbrales intensidad–duración aplicables a suelos residuales de los Andes ecuatorianos.

Conclusiones

De los resultados mostrados, de su análisis y de su discusión, se pueden obtener las siguientes conclusiones: 1) el acople SEEP/W–SLOPE/W reprodujo el mecanismo de falla somero controlado por el contacto suelo–saprolita, con superficie crítica por encima del freático regional; 2) la lluvia persistente reduce el FS de 1.87 a ≈ 1.27 (−32 %), por debajo del umbral normativo de 1.50, aunque sin alcanzar la falla total; 3) el efecto barrera de la saprolita genera un nivel freático colgado que domina la estabilidad, la cual resulta insensible al área saturada adicional y a la elevación del freático regional; 4) el talud a 45° sin drenaje no conserva su margen de seguridad bajo el invierno andino, por lo que se recomienda drenaje superficial y subdrenes en la cara del talud; y 5) el enfoque estacionario de saturación progresiva constituye

una alternativa conservadora válida cuando las restricciones computacionales impiden el análisis transitorio.

Referencias bibliográficas

Alonso, E. E., Gens, A., y Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique, 40(3), 405-430.

Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. Teknisk Ukeblad, 106(39), 859-863.

Cho, S. E., y Lee, S. R. (2001). Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration. Computers and Geotechnics, 28(3), 185-208.

Collins, B. D., y Znidarcic, D. (2004). Stability analyses of rainfall induced landslides. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(4), 362-372.

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., y Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, 15(3), 313-321.

Fredlund, D. G., y Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley y Sons.

Fredlund, D. G., y Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31(4), 521-532.

Gariano, S. L., y Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. Earth-Science Reviews, 162, 227-252.

GEO-SLOPE International Ltd. (2021). GeoStudio 2021 R1: SEEP/W and SLOPE/W user's guides. Seequent.

Godt, J. W., Baum, R. L., y Lu, N. (2009). Landsliding in partially saturated material. Geophysical Research Letters, 36(2), L02412.

INAMHI. (2021). Anuario meteorológico del Ecuador. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. https://servicios.inamhi.gob.ec/anuarios-metereologicos/

Lu, N., y Likos, W. J. (2004). Unsaturated soil mechanics. John Wiley & Sons.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015): NEC-SE-GC Geotecnia y cimentaciones. Registro Oficial Nº 413.

Morgenstern, N. R., y Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1), 79-93.

Ng, C. W. W., y Shi, Q. (1998). A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. Computers and Geotechnics, 22(1), 1-28.

Rahardjo, H., Lee, T. T., Leong, E. C., y Rezaur, R. B. (2005). Response of a residual soil slope to rainfall. Canadian Geotechnical Journal, 42(2), 341-352.

Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B., y Leong, E. C. (2007). Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(11), 1381-1392.

Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, 1(5), 318-333.

Tsai, T. L., y Yang, J. C. (2006). Modeling of rainfall-triggered shallow landslide. Environmental Geology, 50(4), 525-534.

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892-898.

Zhang, L. L., Fredlund, D. G., Zhang, L. M., & Tang, W. H. (2004). Numerical study of soil conditions under which matric suction can be maintained. Canadian Geotechnical Journal, 41(4), 569-582.

Fong-Silva, W., Taron-Dunoyer, A., y Zabaleta-Mesino, R. (2019). Nuevo liderazgo organizacional para fortalecer instituciones universitarias débilmente acopladas según Weick. IPSA Scientia, revista científica multidisciplinaria, 4(1), 60-70. https://doi.org/10.25214/27114406.938