

Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en la producción de sedimentos en laderas

Analysis of the influence of vegetation cover on slope sediment production

Patricia Castillo¹, Josué Castrellón¹, Cristhian Caballer¹, Stephania Rodríguez¹

¹ Grupo de Investigación de Ingeniería Geotécnica, Universidad Tecnológica de Panamá

*Autor de correspondencia: stephania.rodriguez@utp.ac.pa

RESUMEN. Debido a factores intrínsecos, cargas climáticas y las consecuencias de las actividades antropogénicas de la zona, el distrito de Tierras Altas es propenso a la ocurrencia de deslizamientos e inundaciones anualmente. La presente investigación analiza la influencia de la cobertura vegetal en el transporte de sedimentos y la estabilidad de laderas. La metodología consiste en el monitoreo de dos secciones de igual longitud en un talud: con y sin vegetación, la colocación de trampas y captar el desprendimiento de material ocasionado por cargas climáticas. El trabajo de campo se enfoca en la clasificación de suelos para puntos estratégicos, determinar las propiedades del material, y la extracción de vegetación predominante para el dimensionamiento de las raíces. La incorporación de una estación meteorológica local permite identificar eventos climáticos y correlacionar parámetros desencadenantes mediante un código en el lenguaje R. Al tratarse de transporte de sedimentos, es necesario un periodo de tiempo prolongado para identificar episodios de mayor o menor desprendimiento de material y analizar la variación volumétrica del material erosionado entre ambas secciones experimentales del talud, donde la data presente muestra la influencia de la cobertura de suelos y eventos de precipitación críticos de 60 mm para días consecutivos de lluvia como elementos importantes de degradación del suelo.

Palabras clave. Cargas climáticas, cobertura vegetal, estabilidad de taludes, sedimentos.

ABSTRACT. Intrinsic factors, climatic scenarios, and anthropogenic activities are fundamental characteristics of landslides and floods annually in the Tierras Altas district, the study focuses on soil degradation as the main trigger of these events. The research focuses on the analysis of the influence of vegetation cover on sediment transport and slope stability. The methodology consists of monitoring two sections of equal length on a slope: with and without vegetation, capturing the detached material caused by extreme climate events. The fieldwork focuses on the classification of soils for strategic points, determining the material's properties, and extracting predominant vegetation for the sizing of the roots. The incorporation of a local meteorological station makes it possible to identify meteorological triggers and correlate the parameters employing a code in the R language. A long period is necessary to identify episodes of greater or lesser detachment of material and analyze the volumetric variation of the eroded material between both experimental sections of the slope, where the present data shows the influence of soil cover and critical precipitation events of 60 mm for consecutive rainy days as important elements of soil degradation.

Keywords. Climatic loads, vegetation cover, slope stability, sediment

1. Introducción

En años recientes la gestión del riesgo de desastres ha crecido exponencialmente debido a los efectos del cambio climático y la transformación de usos de suelos, es por lo que el Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050 establece metas para respaldar el crecimiento

socioeconómico y asegurar la integridad del ambiente. Estas metas abarcan la gestión preventiva de riesgos, diagnóstico y establecimiento de planes para la adaptación y mitigación, manejo de cuencas hidrográficas, y la conservación de suelos y aguas [1].

Citación: Primera_letra_nombre. Apellido, "Título_artículo", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 19, no. 1, pp. (0), 2023.

Tipo de artículo: No_modificar. **Recibido:** No_modificar. **Recibido con correcciones:** No_modificar. **Aceptado:** No_modificar.

DOI:

Copyright: 2023 Primera_letra_nombre. Apellido. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

A nivel distrital el Plan de Seguridad Hídrica de Tierras Altas define los problemas, metas y retos a la seguridad hídrica del distrito. La gestión preventiva es relevante para el distrito debido al historial de desastres y riesgos asociados a deslizamientos e inundaciones, en que factores como la precipitación, la geomorfología y el tipo de suelo pueden incrementar los riesgos [2]. Mundialmente, son múltiples las regiones que no cuentan con información detallada en relación con niveles de degradación de suelos, más allá de aplicaciones de modelos globales que pueden no representar las causas y desencadenantes locales de mayor impacto [3]. Siendo de vital importancia la investigación de la interacción entre los factores intrínsecos y desencadenantes para la zona de estudio ubicada en el distrito de Tierras Altas, tomando como base comparativa la presencia de vegetación.

Se consideran factores intrínsecos a aquellas propiedades características del suelo: tipo de suelo, tamaño de partículas, cohesión, ángulo de fricción, entre otras. En el caso de los factores externos se estudian la ocurrencia de eventos meteorológicos como la precipitación y su influencia. La base comparativa implica el estudio de taludes con y sin vegetación a fin de contrastar la estabilidad de los taludes y el proceso de degradación del suelo.

1.1 Antecedentes históricos

La cobertura, el uso de suelo y sus cambios relacionados a la obra del hombre, son frecuentemente las principales causas de erosión acelerada [4]. Esto representa una de las principales problemáticas ambientales, debido a su influencia en la sedimentación y los deslizamientos. Los cuales se derivan de las actividades antropogénicas que se dan en la zona, especialmente la agricultura, siendo esta la principal actividad económica de la región [2].

La frecuencia de deslizamientos causados por la escorrentía superficial aumenta significativamente durante la temporada de invierno. Estos eventos recurrentes representan un riesgo constante, como lo evidencian fenómenos pasados como el huracán Otto, que en 2016 afectó a más de dos mil personas, y el huracán Eta, que en 2020 causó daños a más de mil personas [5]. Actualmente, se observa la influencia de la onda tropical #4, y las lluvias de 33 mm se perfilan como escenarios comunes en esta zona de riesgo.

El Instituto Meteorológico Hidrológico de Panamá (IMHPA) anunció el inicio de la temporada de huracanes a partir del mes de junio, y un aviso de vigilancia debido

a proyecciones en la acumulación de lluvias diarias de hasta 60 mm [5]. Esto representa un desafío adicional para las comunidades debido a que la combinación de precipitaciones intensas junto con la vulnerabilidad del suelo debido a la actividad humana aumenta significativamente el riesgo de inundaciones repentinas, deslizamientos y otros eventos catastróficos.

1.2 Degradación de suelos

La escorrentía superficial, la erosión y el transporte de sedimentos son procesos naturales relacionados con el ciclo hidrológico. Estos procesos inician debido a la lluvia, el flujo superficial puede ocasionar erosión, llevando sedimentos a lo largo de la dirección de flujo, y en ocasiones, causando afectaciones en el suelo y el entorno [6].

La erosión es el desgaste del suelo, percibido como desprendimiento de sedimentos, que pueden ser luego transportado naturalmente por el agua [7], puede ocurrir debido a factores antropogénicos y a través interacción de eventos de precipitación, las propiedades del suelo, la cobertura vegetal y sus características, pendientes, uso de suelo y sus medidas de conservación [8], [9].

El transporte del material erosionado hacia las partes bajas de la cuenca provoca una incompatibilidad entre la capacidad de los cuerpos de agua y la carga de sedimentos añadida [10]. De igual forma, el desprendimiento de material ocasionado por la escorrentía superficial por factores inducidos resulta en la reducción de la capacidad de enraizamiento [11].

Es necesario controlar el tamaño de deslizamientos, reduciendo los efectos de fenómenos como la escorrentía. La parte más crítica se da en la corona del talud, de modo que reforzar con vegetación provee resistencia a deslizamientos [12].

Los materiales típicos para el control de la erosión incluyen geosintéticos, tejidos orgánicos, capas de materiales como paja o grava y vegetación [13].

1.3 Impacto ambiental y gestión de riesgos

Panamá se describe como un país con impacto negativo en la tasa de erosión global, teniendo un aporte superior a la media, siendo esta de $2,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ [14]. La agricultura juega un papel importante en la erosionabilidad del suelo, tal como ocurre con el distrito de Tierras Altas, cuya actividad agrícola en las laderas de cerros y montañas.

Localmente no existe información actual suficiente para generar y cuantificar tasas de erosión a nivel nacional. La ocurrencia de la erosión, y el transporte de

sedimentos representan un impacto ambiental negativo, al relacionarse con degradación de suelos, pérdida de biodiversidad y alteración del entorno, lo que conlleva riesgos como deslizamientos, socavación, obstrucción de drenaje y contaminación de acuíferos [15], [16]. Por lo que es importante identificar los riesgos y efectos, así como definir estrategias de mitigación de riesgos.

Entre las medidas existentes, para la gestión de riesgos asociados a la degradación de suelos, se encuentra la reducción de sedimentos, para ello se pueden aplicar medidas como barreras, presas de control de azolves, cercas de filtro, trampas de sedimentos o reforestación [17].

Es posible predecir los riesgos asociados a laderas considerando sus características, por lo que las medidas de prevención para la gestión del riesgo incluyen modificar la geometría, mejorar el drenaje, planificación territorial y estructuras de soporte [18].

El uso de vegetación reduce la erosión superficial, proporcionando cobertura vegetal y reforzando el enraizamiento, mejorando incluso la resistencia frente a deslizamientos [19]. Este efecto se da gracias a la reducción de la presión de poros y de la conductividad hidráulica del suelo a través de la absorción del agua en las raíces [20]. El uso adecuado de vegetación en taludes puede prevenir que ocurra erosión [21].

2. Metodología

Para asegurar la efectividad de las medidas implementadas, se lleva a cabo el monitoreo; que permite dar seguimiento a la degradación y la movilización de los sedimentos a lo largo de la superficie del suelo, permitiendo identificar zonas de rotura en el talud [22].

El monitoreo permite determinar el comportamiento e importancia de los eventos, en este caso relacionados a la estabilidad de taludes. Asociar el material obtenido con los eventos externos desarrollados permite determinar la importancia en la influencia de estos efectos [23].

2.1 Selección de sitio

La selección de sitio fue realizada a través de un mapa de susceptibilidad a deslizamientos y un reconocimiento de campo con el objetivo de encontrar una estructura de geometría y características adecuadas para dar cumplimiento al objetivo de la investigación, donde converjan propiedades de alta montaña y uso de suelos relacionados a la agricultura, como se describe en la Figura 1.

A fin de cuantificar la variación volumétrica de material erosionado, el área de estudio fue definida como dos secciones paralelas de un talud de cuatro metros de longitud cada una, de manera que la sección A (TD) se encontrase en condición desnuda y la sección B (TC) con cobertura vegetal nativa de la zona, Figuras 2 y 3, respectivamente.



Figura 1. Sitio de estudio para el distrito de Tierras Altas



Figura 2. Sección experimental sin cobertura vegetal (TD)



Figura 3. Sección experimental con cobertura vegetal (TC)

2.2 Extracción de muestras de sitio

Con la intención de realizar un perfil descriptivo del talud experimental se llevaron a cabo extracciones de muestras de tres puntos clave: (1) en la base del talud se realizó un Ensayo de Penetración Estándar (SPT) estratigráfico hasta una profundidad de cinco metros, mediante la norma ASTM D1586[24], (2) en la extensión

del cuerpo del talud, se tomaron tres muestras a intervalos de un metro, y (3) una muestra en la corona del talud, donde se visualizó material vegetal.

Adicionalmente se recupera el material degradado debido al efecto de arrastre en un evento de precipitación, se desarrolla un método de recolección utilizando mallas textiles de bajo costo y con aberturas mínimas para reducir la filtración de muestras de suelo.

Al validar la efectividad de los materiales propuestos, las trampas de sedimentos fueron diseñadas como un sistema de tamizaje de dos niveles, de manera que una malla superior con mayor abertura retenga partículas gruesas y materia orgánica, seguido de una malla inferior de abertura mínima para retener finos y permitiendo la filtración de agua.

2.3 Extracción de vegetación predominante

Con el objetivo de conocer la influencia de la cobertura vegetal en el transporte de sedimento, se realizó una extracción de vegetación predominante y determinaron las dimensiones de sus raíces.

Esto tomando en consideración que la profundidad de la zona de la raíz en relación con la profundidad del deslizamiento es el parámetro más importante en el efecto mecánico de la vegetación [25].

La profundidad y distribución de las raíces puede influir significativamente en la capacidad de retención del suelo y la prevención de deslizamientos. Es importante no solamente considerar la profundidad de las raíces, sino también, su extensión lateral y su densidad en el suelo. Estos son factores determinantes para evaluar la estabilidad del talud y al diseñar soluciones de estabilización basadas en la presencia de vegetación [26].

De manera que, las características de las raíces pueden afectar la estabilidad de un talud, al aportar diferentes valores de resistencia, por lo que la extracción de vegetación proporciona información valiosa que contribuye a mejorar la comprensión de la condición del talud y por tanto la gestión de los riesgos asociados a la inestabilidad.

2.4 Metodología de laboratorio

Para la clasificación de suelos se trabajó con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), mediante la norma ASTM D2487[27]. Se realizaron tres pruebas de laboratorio:

(1) granulometría de suelos, utilizando la norma ASTM D6913[28],

(2) determinación de los límites plásticos y líquidos del suelo (Límites de Atterberg), mediante la norma ASTM D4318[29], define los estados de consistencia de la muestra estudiada, y

(3) la granulometría de suelos finos mediante el método hidrométrico, ASTM D422[30].

La granulometría utiliza el criterio de tamiz de abertura cuadrada con el objetivo de determinar la gradación de las partículas. La prueba de límite líquido utiliza el método multipunto y de laminación manual para la determinación del límite plástico. La granulometría de suelos finos se basa en el principio de sedimentación y la Ley de Stokes, y parámetros de coeficiente de viscosidad del agua, diámetro de la esfera y pesos específicos.

2.5 Metodología de análisis de cargas desencadenantes

La información correspondiente a los eventos climáticos que tomaron lugar durante el desarrollo del estudio fue recolectada utilizando una estación meteorológica ATMOS- 41, situada a aproximadamente a veinte metros del sitio de estudio. El tiempo de recolección de la información de desencadenantes climáticos correspondió a un intervalo de quince semanas.

Este equipo fue diseñado para la recolección y el monitoreo continuo de variables ambientales y cargas climáticas e incorpora múltiples sensores como piranómetros, anemómetros, pluviómetros, entre otros; es posible obtener información relacionada a variables como radiación solar, precipitación, temperatura del aire, presión barométrica, humedad relativa, viento y dirección de viento.

2.6 Análisis de cargas desencadenantes en el lenguaje de programación R

El análisis de la data meteorológica adquirida se realizó mediante un código de R. Para esto, se utilizó data meteorológica correspondiente a temperatura (°C) y precipitación (mm) recolectada durante el período de estudio, en intervalos de cinco minutos.

Las temperaturas diarias fueron segregadas en sus valores mínimos, máximos y promedios, mientras que el registro de precipitación fue procesado como un valor acumulado diario, con el fin de identificar niveles máximos por encima de la media.

De igual forma, se identificaron las fechas de recolección de muestras de suelo en función de los parámetros de temperatura diaria y precipitación

acumulada; así como los volúmenes de muestreo en función de las fechas de recolección.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos corresponden a la clasificación de suelos, el análisis de data meteorológica, la variación volumétrica de material erosionado, y la correlación de resultados en función de transporte de sedimentos.

La primera gira de reconocimiento determinó la presencia de fracturas y cicatrices pertenecientes a un deslizamiento anterior, que interrumpió la circulación de la carretera. El punto seleccionado describe topografía montañosa, se encuentra dentro de un área de plantación de café y a un kilómetro de distancia del río Chiriquí Viejo, conocido por la elevada energía dinámica y su relación con eventos de deslaves.

3.1 Clasificación de muestras

Los resultados de clasificación de suelos del perfil estratigráfico para el cuerpo del talud (S-1, S-2 y S-3) y la corona del talud (C-1), muestra material predominante Arena Arcillosa (SC), lo que muestra una dinámica de sedimentos gruesos y finos en la granulometría global del talud y, permite establecer las propiedades intrínsecas.

El índice de plasticidad varía de acuerdo con la degradación del suelo, para la corona del talud se identifica un valor de 16,06, ligeramente más elevado que los valores determinados para el cuerpo del talud (en promedio 10,72) lo que indica menor resistencia, pero mayor cohesión.

3.2 Recolección de sedimentos

Se realizaron tres recolecciones de muestras, en intervalos de cuatro a cinco semanas, las mediciones requieren períodos prolongados de tiempo o la ocurrencia de eventos climáticos de mayor intensidad.

Como se observa en las Figuras 4 y 5, existe una diferencia visible en la cantidad de material recolectado al comparar los taludes TD y TC. Una diferencia en la gradación de partículas fue identificada, en la sección TD, se encontraron partículas mayores de 0.4 mm y fragmentos de roca; a diferencia de la sección TC, en donde principalmente fue recogido material orgánico y partículas finas de suelo.

En la Figura 6, se presenta los resultados correspondientes a la masa retenida y las recolecciones de muestras fueron tomadas luego de los primeros eventos de precipitación intensa del año durante la estación lluviosa.



Figura 4. Recolección de muestras en la malla superior (sarán) para (izquierda) talud TD y (derecha) talud TC



Figura 5. Recolección de muestras en la malla inferior (poliéster) para (izquierda) talud TD y (derecha) talud TC

Se registra el volumen erosionado para el talud desnudo y el talud con cobertura vegetal, con 20,23 kg y 1,09 kg recolectados, respectivamente. La medición más crítica corresponde a aquella realizada después del evento principal de precipitación.

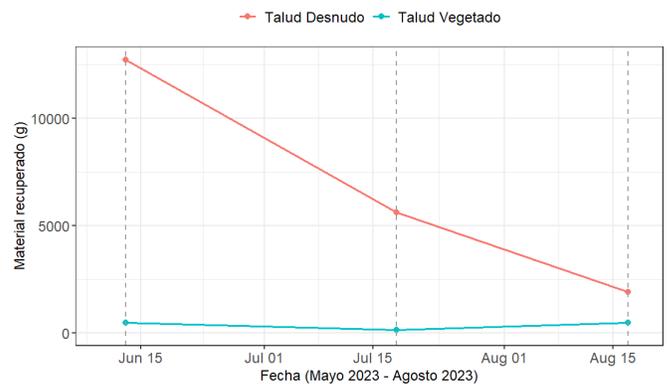


Figura 6. Gráfica de volúmenes de sedimento recolectado a través de las trampas de sedimento.

3.3 Correlación de parámetros meteorológicos y erosión

En las Figuras 7 y 8 se muestran las tendencias climáticas con respecto a precipitación acumulada y temperatura diaria, respectivamente. Se observó una precipitación máxima acumulada de 57.29 mm para uno de los eventos desencadenantes y temperaturas oscilantes entre 13.9°C y 25.3°C.

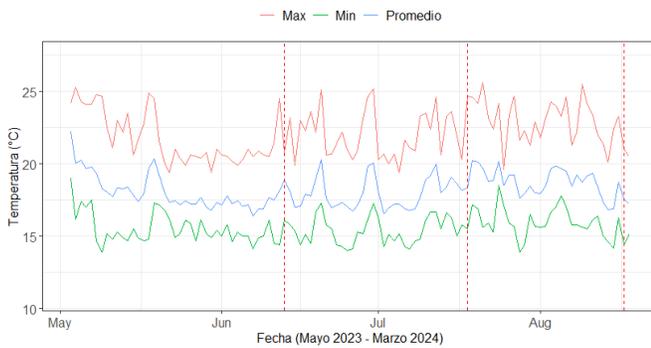


Figura 7. Gráfica de temperatura diaria en un período de quince semanas.

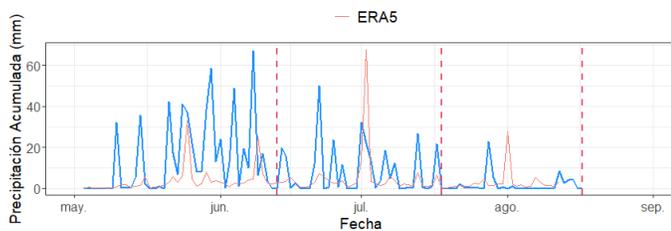


Figura 8. Gráfica de precipitación acumulada diaria en un período de quince semanas.

Posterior al mayor evento, no fue registrado un nivel de precipitación mayor, en su lugar, se dieron precipitaciones de menor intensidad y con mayor separación. Consecuentemente, el volumen de sedimentos recolectado fue menor con respecto a la primera recolección, realizada luego del evento principal.

3.4 Acción de la cohesión de raíces

En la Figura 9 se ilustran las dimensiones de las raíces pertenecientes a dos muestras de vegetación predominante. Las muestras R-1 y R-2 fueron identificadas como especímenes de las familias Cyperaceae y Aspleniaceae, respectivamente. Para la primera, se determinó un largo mayor a 21 cm y 18 cm de ancho aproximadamente; mientras que, la muestra R-2, identificada como un espécimen de la familia, mostró dimensiones aproximadas de 22 cm y 24 cm.

Actualmente, existen menos evidencias del efecto de la vegetación herbácea con respecto a la vegetación leñosa en la estabilización de taludes. Sin embargo, el impacto de ambas se puede clasificar por (a) sus características mecánicas, como refuerzo de suelo y transmisión de fuerza del viento, y (b) sus propiedades hidrológicas, como la reducción de humedad del suelo[25]. En donde, el primero puede impactar positivamente la estabilidad únicamente en el área de las raíces, mientras que el efecto hidrológico tiene una zona de impacto mayor [20]. El

grado de estabilización final es la suma de ambas propiedades dentro de una evaluación de riesgos local, tomando en cuenta parámetros de profundidad, topografía, patrones climáticos y características del suelo[19].



Figura 9. Determinación de dimensión de raíces para vegetación predominante para muestras R-1 (izquierda) y R-2 (derecha).

Las variaciones en las condiciones hidrológicas del suelo son, comúnmente, un desencadenante de falla en taludes, al existir una sobrecarga debido al aumento de contenido de agua. La vegetación y sus raíces tienen un impacto positivo a través de la absorción de humedad y el incremento de la cohesión del suelo [19]. Con el objetivo de ampliar sobre el impacto de este parámetro, un ensayo de corte directo para muestras con y sin raíces vegetales es planteado como siguiente paso a seguir.

3.5 Aplicaciones a escala regional

Los resultados obtenidos de experimentos en escalas tipo talud permiten determinar niveles de detalles y caracterización del proceso que en procesos posteriores busca extrapolar las experiencias a escalas regionales y evaluar mapeos de riesgos entrelazados a estos aspectos. De allí que considerar el potencial de utilizar datasets históricos y de proyecciones de clima permitirá la explotación de los resultados obtenidos.

Se obtuvo una correlación entre la data meteorológica de la estación ATMOS-41 (Zona de estudio) y el repositorio de data ERA5 para el parámetro de precipitaciones, en la figura 8 se muestra el gráfico del modelo ERA5 (rojo), en comparación con la data de la estación meteorológica (azul).

Las magnitudes para las precipitaciones son similares, lo que representa consistencia entre los modelos de ERA5 y la data de sitio, así como las tendencias en los aumentos y descensos y los lapsos de tiempo.

4. Conclusiones

- Todos los suelos, especialmente aquellos en pendiente, experimentan una constante degradación del material, lo que resulta en un tipo de almacenamiento casi pasivo en la propia pendiente. Este material puede ser desplazado por el viento o el agua a pequeña escala, aunque se necesita un evento de mayor magnitud para movilizar el material almacenado. Se llevó a cabo un estudio sobre la interacción de cinco factores: tipo de suelo, presencia de vegetación, precipitación y temperatura. Se caracteriza por la presencia de material fino en la superficie del terreno y de arenas a una profundidad considerable, lo que le confiere la capacidad de filtrar y conducir agua de manera eficiente.
- En cuanto a vegetación, el material presente es nativo de la zona, de estructura y raíces pequeñas y poco profundas. El mismo promueve notablemente la conservación de estabilidad y da lugar a una degradación más lenta del suelo. El almacenamiento parcial de sedimento en las raíces se aprovecha para ralentizar el proceso de erosión, debido a influencia de la temperatura y protección contra la radiación.
- Durante los primeros eventos de precipitación, no se observarán cambios drásticos en la estructura del talud; sin embargo, con el aumento gradual de la frecuencia e intensidad de las lluvias, se producirá un cambio gradual de la composición del suelo, pasando de arcillas a arenas. Este proceso llevará eventualmente a la ruptura del talud. Un evento de lluvia más intenso (60 mm) generó suficiente escorrentía superficial para remover el material degradado. Esto indica que el talud alcanzó su estado de saturación completa, donde la escorrentía superficial superaba la capacidad de infiltración.
- Al considerar la temperatura se reconoce que el umbral mínimo – máximo es un factor importante en la transición del estado de saturación del talud, evitando que el talud pasara de un estado saturado a parcialmente saturado. El pico de temperatura provocará que el talud regrese a un estado parcialmente saturado o seco y renovará el proceso de degradación del suelo.
- Debido a la estrecha relación que existe entre la disminución de transporte de sedimentos, la estabilidad de taludes y la presencia de vegetación se plantea un estudio de cohesión de raíces como futura línea de investigación. Al contar con suelos

predominantemente arenosos, la presencia de raíces aporta resistencia a la estructura al reducir el impacto de escorrentía y erosión.

- Se recomienda como futura línea de investigación un análisis con respecto a las tendencias históricas climáticas de la zona, en el cual se acoplen parámetros como aumento en la intensidad y frecuencia de precipitación e incremento de temperaturas debido a los efectos del cambio climático y su efecto en la estabilidad de taludes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación bajo el proyecto APY-NI-2022-18. A los miembros del Grupo de Investigación en Ingeniería Geotécnica, el personal del Laboratorio de Suelos y Materiales de Chiriquí y a la Universidad Tecnológica de Panamá por su extensa colaboración y su asistencia técnica en el desarrollo de esta investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

- Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Autor	Contribución	Porcentaje
PC	Diseño de metodología y recolección de datos en campo, ensayos de laboratorio, desarrollo del manuscrito	35%
JC	Recolección de datos en campo, ensayos de laboratorio desarrollo del manuscrito	20%
CC	Recolección de datos en campo, desarrollo del manuscrito, análisis de aplicaciones a escala regional	20%
SR	Análisis e interpretación de la data, desarrollo del manuscrito.	25%

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Consejo Nacional del Agua, "2015-2050 AGUA PARA TODOS SEGURIDAD HÍDRICA," Panamá, nov. 2016.
- [2] Consorcio PROYECO-DICEASA, "PLAN DISTRITAL DE SEGURIDAD HÍDRICA DE TIERRAS ALTAS, PROVINCIA DE CHIRIQUÍ," Panamá, 2019.
- [3] P. Borrelli, C. Alewell, P. Alvarez, and et. al, "Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis," *Science of the Total Environment*, vol. 780, no. 146494, 2021.
- [4] Xin Wen and Lin Zhen, "Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review," *Environ Dev*, vol. 34, no. 100493, 2020.
- [5] Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá, "Avisos de Vigilancia," *Tiempo*.
- [6] D. Chalise, L. Kumar, and P. Kristiansen, "Land degradation by soil erosion in Nepal: A review," *Soil Systems*, vol. 3, no. 1. MDPI AG, pp. 1–18, Mar. 01, 2019. doi: 10.3390/soilsystems3010012.
- [7] H. Lamane et al., "Soil water erosion assessment in Morocco through modeling and fingerprinting applications: A review," *Heliyon*, vol. 8, no. 8. Elsevier Ltd, Aug. 01, 2022. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10209.
- [8] N. S. B. N. Ahmad, F. B. Mustafa, and G. Didams, "A systematic review of soil erosion control practices on the agricultural land in Asia," *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 8, no. 2, pp. 103–115, 2020.
- [9] J. Chen, X. Li, H. Xiao, K. Ning, and C. Tang, "Effects of land use and land cover on soil erosion control in southern China: Implications from a systematic quantitative review," *J Environ Manage*, vol. 282, no. 111924, 2021.
- [10] S. Pandey, P. Kumar, M. Zlatic, R. Nautiyal, and V. P. Panwar, "Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed," *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 9, no. 3, pp. 305–318, 2021.
- [11] Paz-González and E. Vidal Vázquez, "Erosión y Escorrentía," Universidad de la Coruña, Jun. 2004. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/314658817>
- [12] Diana Vásquez Guerra, "Manual de procedimientos generales para obras de control de procesos erosivos y deslizamientos pequeños en taludes teniendo en cuenta factores in situ como el clima, las características del suelo y la morfología del terreno," Medellín, 2018.
- [13] D. Fan, G. Jia, Y. Wang, and X. Yu, "The effectiveness of mulching practices on water erosion control: A global meta-analysis," *Geoderma*, vol. 438, no. 116643, 2023.
- [14] D. Wuepper, P. Borrelli, and R. Finger, "Countries and the global rate of soil erosion," *Nat Sustain*, vol. 3, no. 1, pp. 51–55, 2020.
- [15] C. Ferreira, S. Seifollahi-Aghmiuni, G. Destouni, N. Ghajarnia, and Z. Kalantari, "Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences," *Science of the Total Environment*, vol. 805, no. 150106, 2022.
- [16] U. Bonthagorla, T. S. K. Reddy, S. Akash, H. Srikanth, and M. Ahmed, "Effects of soil erosion and control: a review," *The Pharma Innovation Journal*, vol. 6, pp. 2925–2933, 2022.
- [17] U. Kumarasinghe, "A review on new technologies in soil erosion management," *JOURNAL OF RESEARCH TECHNOLOGY AND ENGINEERING*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [18] X. Liu, H. Li, S. Zhang, R. M. Cruse, and X. Zhang, "Gully erosion control practices in Northeast China: A review," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 18, Sep. 2019, doi: 10.3390/su11185065.
- [19] M. T. Löbmann, C. Geitner, C. Wellstein, and S. Zerbe, "The influence of herbaceous vegetation on slope stability – A review," *Earth-Science Reviews*, vol. 209. Elsevier B.V., Oct. 01, 2020. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103328.
- [20] S. Feng, H. W. Liu, and C. W. W. Ng, "Analytical analysis of the mechanical and hydrological effects of vegetation on shallow slope stability," *Comput Geotech*, vol. 118, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.compgeo.2019.103335.
- [21] L. M. Highland and P. Bobrowsky, *The landslide handbook-A guide to understanding landslides*, no. 1325. US Geological Survey, 2008.
- [22] N. Mazigh, A. Taleb, A. El Bilali, and A. Ballah, "The Effect of Erosion Control Practices on the Vulnerability of Soil Degradation in Oued EL Malleh Catchment using the USLE Model Integrated into GIS, Morocco," *Trends in Sciences*, vol. 19, no. 2, 2022.
- [23] I. Villegas-Romero, A. Macedo-Cruz, and G. Carrillo-Espinosa, "Avances de un sistema de monitoreo de la erosión hídrica y calidad del agua en cuatro microcuencas forestales del campo las cruces," *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, vol. 1, no. 2, pp. 1–17, 2011.
- [24] ASTM International, "Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils," in *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.08, 2022.
- [25] M. Emadi-Tafti, B. Ataie-Ashtiani, and S. M. Hosseini, "Integrated impacts of vegetation and soil type on slope stability: A case study of Kheyroud Forest, Iran," *Ecol Modell*, vol. 446, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2021.109498.

- [26] F. Grajales Saavedra, R. Vallarino, G. Mejía, and D. Centella, “Bioingeniería de taludes: evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad,” *Revista de Iniciación Científica*, vol. 7, no. 2, pp. 26–38, 2021, doi: 10.33412/rev-ric.v7.2.3336.
- [27] ASTM, “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System),” in *Annual Book of ASTM Standard*, vol. 04.08, 2020.
- [28] ASTM, “Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis,” in *Annual Book of ASTM Standard*, vol. 04.09, 2017.
- [29] ASTM, “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils,” in *Annual Book of ASTM Standard*, vol. 04.08, 2018.
- [30] ASTM, “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils,” in *Annual Book of ASTM Standard*, vol. 04.08, 2014.