

Bioingeniería de taludes: evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad

Slope bioengineering: assessment on using trees and shrubs as a possible mechanism for increasing the factor of safety

Ruby Vallarino¹, George Mejía¹, Dylan Centella^{2,3}, Francisco Grajales Saavedra^{4*}

¹Licenciatura en Ingeniería Marítima Portuaria, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá

²Licenciatura en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá

³Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign

⁴Grupo de Investigación en Geotecnia Aplicada, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá

*Autor de correspondencia: francisco.grajales@utp.ac.pa

Resumen. Diversos estudios han demostrado la influencia positiva de la vegetación en la estabilidad de los suelos, la cual genera un cambio significativo en las condiciones hidrológicas del suelo. Uno de los aportes más importantes de la vegetación es el que generan las raíces sobre la resistencia al corte del suelo; lo cual puede ser cuantificado mediante un aumento en la cohesión del suelo a través de una variable conocida como: “cohesión aparente o relativa”. Este artículo presenta una evaluación de los efectos positivos que pueden producirse mediante la inclusión de árboles y arbustos en la parte baja de taludes. Para esta investigación se realizó una revisión de literatura, consultas con expertos y se desarrolló una simulación numérica utilizando el método de los elementos finitos en dos dimensiones. Las simulaciones utilizan la cohesión aparente como la variable que define el aporte de las raíces a la cohesión del suelo. Se realizaron análisis de estabilidad en diferentes tipos de taludes donde se pudo cuantificar el factor de seguridad generado por los distintos valores de cohesión aparente y determinar la influencia de la profundidad de las raíces. Los resultados de esta investigación indican que existe un sustento para la consideración de árboles o arbustos como solución de bioingeniería para la estabilización de taludes y presenta recomendaciones basadas en las evidencias e información obtenidas.

Palabras clave. Cohesión aparente, estabilización biotécnica, taludes, vegetación.

Abstract. Various studies have shown the positive influence of vegetation on soil stability, which generates a significant change in the hydrological conditions of the soil. One of the most important contributions of the vegetation is that generated by the roots to the shear strength of the soil; which can be quantified by an increase in soil cohesion through a variable known as: “apparent or relative cohesion”. This article presents an assessment of the positive effects that can be produced by the inclusion of trees and shrubs in the lower part of slopes. For this research, a literature review was carried out, consultations with experts and a numerical simulation was developed using two-dimensional finite element method. The simulations use apparent cohesion as the variable that defines the contribution of the roots to the cohesion of the soil. Stability analyses were carried out for different types of slopes where the safety factor generated by the different values of apparent cohesion was quantified and the influence of from the depth of the roots was determined. The results of this research indicate that there is support for the consideration of trees or shrubs as a bioengineering solution for the stabilization of slopes and presents recommendations based on the evidence and information obtained.

Keywords. Apparent cohesion, biotechnical stabilization, slopes, vegetation.

1. Introducción

El deslizamiento de un talud es un evento geotécnico que incluye una amplia gama de movimientos de tierra, tales como: el desprendimiento de rocas y fallas profundas en pendientes, que pueden causar problemas en diversas obras civiles, comocarreteras y presas, lo cual, además de resultar en

pérdidas económicas, también resulta en pérdidas de vidas humanas.

En función del desarrollo económico y otros fines en los últimos años, se ha presenciado la ejecución de una gran cantidad de proyectos que generan la implementación de diferentes métodos de estabilización de taludes, como, por

ejemplo: muros de gaviones, colocación de geotextiles y anclajes o muros anclados, con el propósito de evitar deslizamientos.

Adicionalmente, se han estado desarrollando técnicas que utilizan el método de estabilización biotécnica del suelo para el diseño de taludes, siendo ésta, una práctica implementada en muchas partes del mundo, además de ser considerada como una alternativa frente a los métodos tradicionales de estabilización de suelo [1]. En la práctica, muchos ingenieros y diseñadores han optado por la colocación de gramas, tales como la Grama Toro y plantas como el Vetiver (ver figura 1), con el propósito de recrear una cobertura vegetal sobre los taludes del tipo natural, la cual actúa como protección ante la erosión del suelo y, por lo tanto, genera un aumento en la estabilidad.

Este tipo de metodologías suelen ser más económicas y eco-amigables, ya que el uso de materiales de construcción es mínimo, además de jugar un papel muy importante en el control de la erosión y preservación efectiva del suelo. Entre los beneficios que ofrece este método, se destaca el aporte al incremento de la resistencia del suelo debido al esfuerzo cortante por parte de las raíces, ya sea de árboles o arbustos.

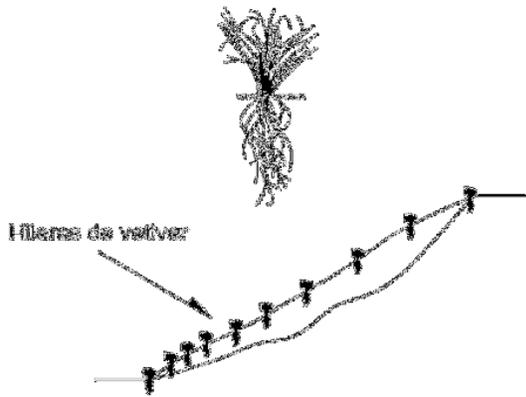


Figura 1. Formas de protección en un talud. Redibujado a partir de Suarez 2009 y Morgan & Rickson 2005 [2], [3].

2. Estabilización biotécnica

La estabilización biotécnica es una técnica que emplea el uso de la vegetación para la estabilización de taludes. Las especies varían dentro de la gama de pastos, arbustos o árboles, y pueden establecerse en el terreno mediante la siembra convencional o plantación viva. Es importante resaltar, que la efectividad de un sistema de refuerzo de suelo depende en gran medida de la profundidad a la que se coloquen las estacas y la profundidad a la que penetrarán las raíces (ver figura 2) [2].

Esta técnica se aplica principalmente a proyectos de estabilización de taludes poco profundos, caracterizados por

taludes inestables con movimiento de superficie. Entre sus principales beneficios, se destaca que la vegetación tiene un efecto en la mejora contra la erosión del suelo, ejerciendo además un efecto mecánico en el talud debido al aumento de la resistencia al esfuerzo cortante y resistencia de tracción en el suelo [1], [3].

La utilización de cobertura vegetal genera una influencia importante sobre el contenido de humedad del suelo, considerando que la misma intercepta un alto porcentaje de la precipitación, acumulándose en hojas y ramas que permiten la evaporación al medio ambiente dentro del ciclo hidrológico. Sin embargo, debido al proceso de la evapotranspiración, la vegetación suele influir directamente sobre el contenido de agua que se concentra en el suelo. Las plantas generalmente suelen succionar una alta cantidad de agua del suelo rica en minerales necesarios para llevar a cabo la fotosíntesis [4].

Por este motivo, al combinarse las técnicas de estabilización biotécnica del terreno con soluciones a largo plazo, las pendientes pueden ser gestionadas de manera más efectiva para la minimización del riesgo de falla.

La elección correcta del material vegetal a utilizar suele ser difícil, ya que se requiere de conocimientos sobre la capacidad de las plantas para crecer en determinados sitios, y de conocimientos sobre la eficiencia del sistema de raíces para fijar y reforzar el suelo en una pendiente inestable. Si bien, dicha información puede estar disponible para una especie en particular, también es necesario conocer el desempeño de ésta a largo plazo [5].

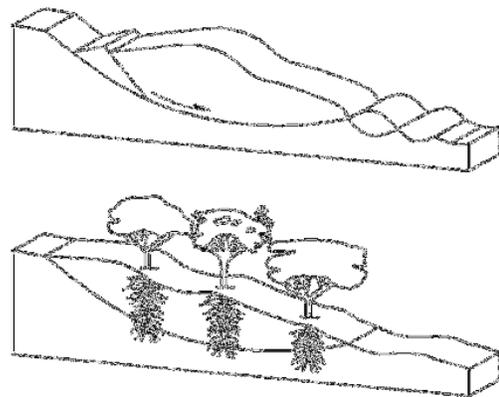


Figura 2. Efecto de las raíces para el control de deslizamientos profundos. Redibujado a partir de Suarez 2009 [3].

2.1 Consideraciones previas

Cuando se elige implementar técnicas de estabilización biotécnica en una pendiente inestable, el ingeniero primero debe evaluar diversos aspectos, entre ellos: (1) la naturaleza de la pendiente, (2) el tipo de suelo, (3) el tipo de vegetación

nativa o deseada en el talud y (4) la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo que sea mecanismo activador de un deslizamiento.

Adicionalmente, en dependencia de la magnitud de la obra, se debe considerar la viabilidad de esta técnica tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si el sitio donde se realizará el proyecto es a pequeña escala, pudiéndose reducir gastos económicos, a la vez de proveerse seguridad y estética al paisaje, entonces las técnicas de bioingeniería del terreno pueden ser consideradas.
- Si el sitio es a gran escala, tal como el caso de una ladera de montañas, los gastos que pueden conllevar la realización de técnicas de estabilización biotécnica pueden ser demasiado altos y sus beneficios se proyectarían a largo plazo.

2.2 Beneficios de la estabilización biotécnica

La estabilidad de las pendientes se rige por las cargas, la cual es considerada como la principal causa de las fallas. Entre los beneficios en que puede influir la vegetación en forma directa e indirecta en la estabilidad de un talud [2], [3], se encuentran:

- La vegetación intercepta la lluvia y extrae agua del suelo a través de la evapotranspiración, reduciendo la humedad del suelo y la presión de los poros.
- Retienen las partículas del suelo, disminuyendo la susceptibilidad a la erosión (figura 2.).
- Mecánicamente las raíces refuerzan el suelo al transferir resistencia por cizalladura, con tensiones de resistencia en la raíz (figura 2.).
- El anclaje y embebido de los troncos hace que éstos actúen como puntales en las laderas, contrarrestando las tensiones por cizalladura. Los troncos actúan como anclas rígidas, favoreciendo el sostenimiento o restricción lateral contra el movimiento superficial del talud.
- Aumenta el coeficiente de rugosidad del terreno, disminuyendo así la velocidad de escorrentía.
- Efecto de infiltración, por el cual las raíces de las plantas ayudan a mantener la porosidad y permeabilidad del suelo.

2.3 Limitaciones de la estabilización biotécnica

- El peso de la vegetación puede resultar desestabilizante y provocar la falla de la pendiente.
- El cultivo de plantas con raíces poco profundas (como el banano y el plátano) agregan carga a la pendiente y alteran la estructura del suelo.
- Puede darse el caso en que las raíces formen grietas, fisuras y canales, causando inestabilidad en la pendiente, especialmente sobre las que contengan masas rocosas. La

saturación de las grietas también podría generar un peso extra que disminuya el factor de seguridad.

- El efecto del serpenteo del viento en los árboles genera una influencia desestabilizante.

2.4 Raíces como mecanismo de refuerzo

El papel de la vegetación en el refuerzo y anclaje depende de factores como la morfología del sistema de raíces, su resistencia, adecuada distribución, e interacción entre la raíz y el suelo [5].

Los sistemas de raíces conducen a un aumento en la resistencia del suelo debido al incremento de la cohesión provocada por la acción de unión en el compuesto fibra/suelo y la adhesión de las partículas de suelo a las raíces [2].

Para poder saber qué tipo de plantas, árboles o arbustos seleccionar para sembrar en los taludes, es importante conocer los diversos tipos de raíces (ver figura 3) y su profundidad [3].

- Lateral: en estos casos la extensión lateral es mayor a la profundidad de las raíces. El amarre de este tipo de raíz es paralelo a la superficie del talud.
- Radial: tienden a profundizarse y también extenderse lateralmente en efecto de arco, lo cual es muy importante en la estabilización para deslizamientos poco profundos.
- Pivote: su raíz suele ser vertical, centrada y profunda con ramificaciones pequeñas.

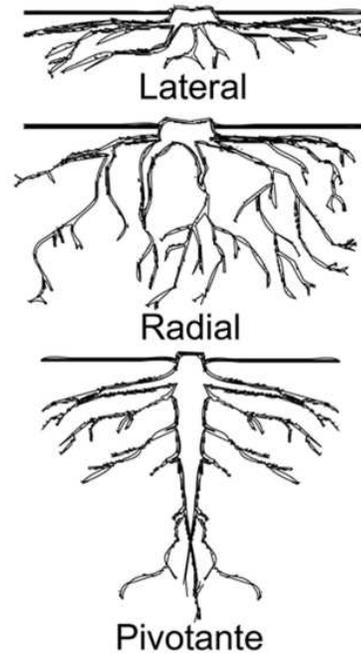


Figura 3. Tipos de raíces. Redibujado a partir de Norris 2008 [5].

Una mezcla de especies de diferentes edades generalmente mejorará la fijación del suelo. Las especies nativas son a menudo una opción adecuada, ya que están adaptadas al entorno local. Los pastos estabilizan la capa superior del suelo contra la erosión; los arbustos y árboles fijan el suelo más profundo, especialmente si las raíces pueden atravesar la superficie de deslizamiento. Si solo se usa una especie, es probable que el refuerzo del suelo sea pobre durante los primeros años. Una vez que se establecen los árboles, la estabilidad de la pendiente aumentará, pero si se maneja incorrectamente dejando grandes espacios entre los árboles, se pueden formar zonas inestables entre ellos. Del mismo modo, la distribución espacial de la vegetación puede conducir a zonas de deslizamiento o erosión [5].

2.4.1 Cohesión aparente

El aporte en las condiciones mecánicas del suelo se ve influenciado principalmente por un aumento en la cohesión del suelo, llamada también “cohesión aparente” o “cohesión relativa” [6]. Este aumento en la cohesión se realiza por parte de las raíces, las cuales generan un aumento en el factor de seguridad debido a un incremento en la resistencia a tensión del talud, estas actúan como un mecanismo similar al de los muros mecánicamente estabilizados con geo-sintéticos.

A partir de diferentes investigaciones realizadas se describió que la cohesión que aportan las raíces depende de muchos factores como: el clima, el tipo de suelo, las especies de plantas, entre otros. Para la cuantificación del aporte en la cohesión, comúnmente se utilizan valores previamente calculados, como es el caso de las investigaciones realizadas en las que se han establecido rangos de valores para diferentes especies, que se podrían utilizar como valores representativos para el cálculo de estabilidad de suelos [7], [8]; ya que estos valores solo pueden ser encontrados mediante ensayos de laboratorio, tales como el ensayo de corte directo.

Algunos investigadores han encontrado que los arbustos y árboles actúan sobre la estabilidad del talud en diferentes formas [9]:

- Uniendo las capas de suelo inestables a las capas estables del subsuelo. Cuando una posible superficie de falla atraviesa la zona donde se encuentra el sistema de raíces-suelo, las raíces aportarán para mantener la estabilidad.
- Proporcionando un manto protector compuesto por el sistema de raíces-suelo, lateralmente estable. Aparentemente este sistema raíces-suelo genera un manto que trabaja como un refuerzo lateral, manteniendo las capas inferiores en forma estables.
- Proporcionando puntos de mayor reforzamiento en las áreas cercanas a los árboles. Debido a que las raíces de los árboles o arbustos se incrustan firmemente entre las capas

del suelo que se encuentran debajo de las posibles superficies de falla.

2.4.2 Modelo matemático de la influencia de las raíces en la estabilidad de suelos

Como se ha descrito anteriormente, el sistema raíces-suelo genera un aumento en la resistencia al corte y se puede cuantificar mediante la incorporación de un término llamado “cohesión aparente” [3], a la ecuación del Criterio de Falla de Coulomb [8]. Algunos investigadores han propuesto un modelo matemático con el propósito de cuantificar el incremento en la resistencia al corte del suelo mediante la siguiente ecuación:

$$S_r = (T(\cos\theta + \operatorname{sen}\theta\tan\phi'))/A \quad (1)$$

Donde;

S_r = aumento en la resistencia al corte proporcionado por las raíces.

T = fuerza de tensión en la raíz.

θ = ángulo de inclinación de la raíz respecto al plano de falla.

ϕ' = ángulo de fricción.

A = área de la sección donde se encuentran las raíces.

Para este análisis el aumento en la resistencia al corte proporcionado por la generación del sistema raíces-suelo fue considerado únicamente como un aumento en la cohesión aparente. De acuerdo con investigaciones realizadas, luego de realizar pruebas en sitio como ensayos de corte directo y estimaciones de cohesión aparente a partir del esfuerzo de tensión de raíces utilizando la ecuación (1), los rangos de cohesión aparente de especies coníferas oscilaban entre valores de 3.00 y 17.50 kPa [9]. Es importante considerar que estos valores dependen en gran medida de las condiciones del clima, del tipo de suelo, de la distribución de la humedad en el suelo y de la especie de planta, por lo tanto, es difícil establecer un valor constante de cohesión aparente.

El término de cohesión aparente se introdujo utilizando paralelamente el método de “Equilibrio Límite”. Para el estudio de la estabilidad de taludes, el método de “Equilibrio Límite” establece que el Factor de Seguridad (FS) se rige por la relación entre la resistencia al corte del talud (T_f) la cual está gobernada por el criterio de falla de Coulomb [10] y los esfuerzos de corte que se generan (T_m).

$$FS = \frac{T_f}{T_m} \quad (2)$$

El criterio de falla de Mohr-Coulomb nos permite definir la falla por cortante de un suelo de acuerdo con su estado de esfuerzos. [9]. La resistencia al corte del suelo, mediante el criterio de falla de Mohr-Coulomb, se da por la siguiente ecuación:

$$T_f = c + (\sigma - \mu)\tan\phi' \quad (3)$$

Donde;

σ = esfuerzo total.

μ = presión de poro.

Para considerar el aporte a la resistencia de corte proporcionado por la generación del sistema raíces-suelo es necesario incorporar el término de “cohesión aparente” en la ecuación del criterio de falla de Mohr-Coulomb [7].

$$T_f = (c + c_R) + (\sigma - \mu)\tan\phi' \quad (4)$$

3. Avances de la bioingeniería de taludes en países tropicales

A nivel internacional se han realizado múltiples investigaciones con la intención de evaluar los beneficios de utilizar vegetación en el manejo preventivo de deslizamientos en taludes.

Algunos de los estudios pioneros sobre el tema, han sido presentados por Brenner [12] y Gray [13]. El primero, realizó un estudio en el cual se evaluó el comportamiento hidrológico de taludes reforzados con vegetación en el cual se demostró que la evapotranspiración producida por las plantas puede reducir las presiones de poro existentes debido al nivel freático. Por su parte, Gray [13] presentó un estudio comprensivo sobre la estabilización de taludes utilizando vegetación, en el cual las conclusiones indicaron que los taludes con forraje vegetal reptan (i.e. se deslizan) a una menor velocidad que aquellos sin cobertura vegetal.

Greenway [14] presentó un estudio en el cual se ilustra la influencia de la vegetación en el comportamiento hidromecánico de los taludes. A partir de esto, Copin y Richard [15] presentaron un modelo matemático para el cálculo del factor de seguridad en taludes tomando en cuenta el efecto de la vegetación.

Gray [16] presentó ampliamente los diversos beneficios que pueden producirse mediante la inclusión de vegetación en taludes, concluyendo que la vegetación produce mejoras en la resistencia de taludes ante la erosión superficial, así como también frente a los movimientos de masa. En contraparte, la remoción de vegetación acelera o incrementa las fallas en taludes.

Adicionalmente, Gray [16] indicó que la presencia de raíces producen un incremento en la resistencia al corte de las masas de suelo, y que la manera más efectiva de lograr un

refuerzo mediante vegetación es procurar que las raíces penetren a través del suelo hasta llegar a los estratos de roca (sana o meteorizada) que se encuentren debajo del talud.

Basado en estos conceptos, Haji Ali y Osman [17] desarrollaron estudios con el fin de determinar la resistencia al corte de suelos reforzados con plantas típicas de regiones tropicales. En su estudio, se utilizaron cuatro especies distintas de plantas: (1) *Vertiveria zizanioides*, (2) *Leucaena leucocephala*, (3) *Bixa orellana* y (4) *Bauhinia purpurea*. La resistencia al corte se verificó mediante pruebas de corte directo modificadas.

Los resultados obtenidos por Haji Ali y Osman [17] indican que la presencia de las cuatro especies incrementa sustancialmente la resistencia al corte y por ende el factor de seguridad de los taludes. Sin embargo, se menciona que dicho aumento en la resistencia es exclusivamente producido por un incremento en la cohesión del suelo.

Estas conclusiones fueron ampliadas gracias a estudios presentados por Nordin Abdullah et al. [18], Khalilnejad et al. [1] y Saifuddin y Normaniza [19], estudios en los cuales se profundizó en la caracterización de las propiedades mecánicas del suelo reforzado, en base a las plantas anteriormente mencionadas, tomando en cuenta la morfología de las estructuras radiculares de dichas especies.

A nivel de Latinoamérica, existen varios estudios realizados tanto en Brasil como en Costa Rica. Sin embargo, es posible que exista mayor cantidad de data, la cual no se encuentra publicada y al alcance de los investigadores.

Silva Orozco [20], presentó un estudio comprensivo sobre la utilización de especies de vegetación nativas de Costa Rica para la estabilización de taludes. En su estudio, se presentan recomendaciones de diversas hierbas, plantas, arbustos y árboles típicos de distintas zonas de vida, las cuales toman en cuenta el rango de altitudes, temperaturas y precipitación existente para recomendar distintas especies que puedan prosperar en dichas condiciones climatológicas.

Finalmente, Maffra et al. [21] presentaron resultados de un estudio similar en muchos aspectos al realizado por Haji Ali y Osman [17] para vegetación típica de la zona atlántica en Brasil. Las conclusiones de dicho estudio indican que similar a los anteriormente mencionados, existe un incremento en la resistencia a la corte asociada a la presencia de raíces en los suelos.

4. Modelación numérica del efecto de las raíces en taludes

4.1 Modelación de casos de estudios de taludes inestables

Para realizar el análisis de refuerzo con raíces se utilizó el *software* Optum G2 2020 versión estudiantil [11], el cual emplea el método de elementos finitos en 2 dimensiones. El programa fue creado en el año 2010 y ha sido utilizado para

diferentes aplicaciones en el área de la ingeniería geotécnica. Para el estudio se asumió el criterio de falla Mohr – Coulomb (drenado) y el método de reducción de fuerzas (Strength Reduction Analysis), dando como resultado valores de factores de seguridad para cada escenario propuesto.

Las dimensiones utilizadas corresponden a un talud homogéneo 1:1 (ver figura 4), donde las propiedades del suelo son tomadas a partir de un material arcilloso. En la siguiente tabla se muestran los valores de suelo utilizados:

Tabla 1. Propiedades del suelo arcilloso

Propiedad del suelo	Valor
E (MPa)	25
ν	0.3
c (kPa)	41.65
ϕ (°)	15
γ_{dry} (kN/m ³)	18
γ_{sat} (kN/m ³)	20

Adicionalmente, se incluyó el aporte de las raíces a la resistencia al cortante del suelo, que se modeló como aporte a la cohesión del suelo, introduciendo así el término de cohesión aparente (C_R). Los valores proporcionados a la cohesión por parte de las raíces se asumieron en oscilación a los 10kPa, 20kPa y 30kPa; otro factor importante a tomar en cuenta en el estudio es la profundidad de las raíces. Para la modelación y el análisis se asumió un sistema de raíces radial-fibroso, considerando una zona de mayor cohesión uniforme en forma de arco.

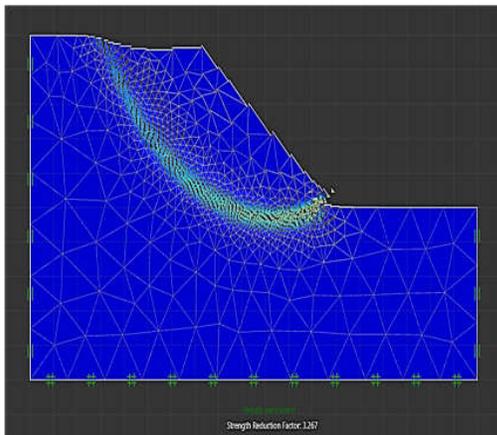


Figura 4. Talud 1:1 modelado en Optum G2.

4.2 Análisis paramétrico

Para el desarrollo del estudio paramétrico se tomaron en cuenta las siguientes variables: radio del sistema de raíces (r),

aporte de cohesión de raíces y cohesión relativa del suelo (c_R), altura del talud (h) y distancia al centro del radio de raíces (d). Los valores utilizados para cada uno de los casos analizados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Dimensiones y condiciones de análisis de talud

Caso	Altura del talud (h)	Ancho del talud	Condiciones
1	5 m	5 m	-Talud sin vegetación en la superficie de pendiente. -Fijaciones estándar utilizadas en los límites del talud.
2	5 m	5 m	-Talud con vegetación sobre la superficie de pendiente. -Fijaciones estándar utilizadas en los límites del talud.
3	5 m	5 m	-Talud con árbol en el pie de la pendiente.
4	15 m	15 m	-Fijaciones estándar utilizadas en los límites del talud.
5	25 m	25 m	-Fijaciones estándar utilizadas en los límites del talud.

Nota: Fijaciones estándar. Esta característica aplica soportes normales a líneas verticales (rodillo) y soportes completos (fijos) a líneas horizontales que definen el límite del dominio.

4.2.1 Resultados

Generalmente en la práctica se utilizan plantas para evitar la erosión y en algunos casos estabilizar taludes, por lo que se realizó una comparativa entre un talud sin vegetación (caso 1) (ver figura 5) y un talud con vegetación en su superficie (caso 2), para analizar el incremento en el factor de seguridad. Se consideró una planta con raíces de 1m de profundidad con un aporte a la cohesión de 5 kPa (ver figura 6), obteniéndose un incremento muy bajo en el factor de seguridad (ver tabla 3). En consecuencia, las plantas pueden ser utilizadas para minimizar la erosión en los taludes, sin embargo, emplear estas prácticas para estabilizar taludes requerirá de métodos adicionales.

Tabla 3. Comparación talud sin vegetación vs. talud con vegetación

Escenario	Altura del talud (h)	Cohesión aparente (C_R)	Factor de Seguridad
Talud sin vegetación	5 m	41.65 kPa	3.294
Talud con vegetación	5 m	46.65 kPa	3.302

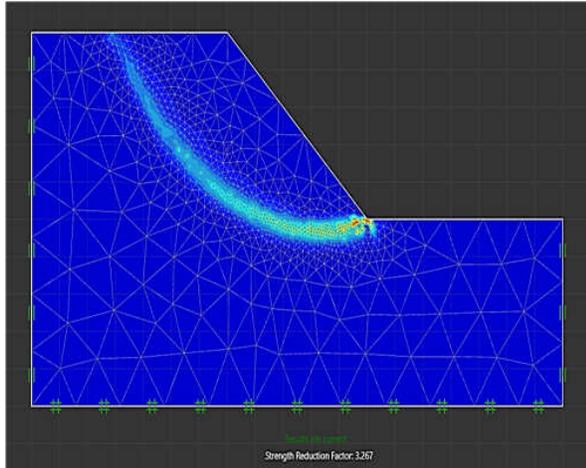


Figura 5. Falla cortante en talud sin vegetación (caso 1).

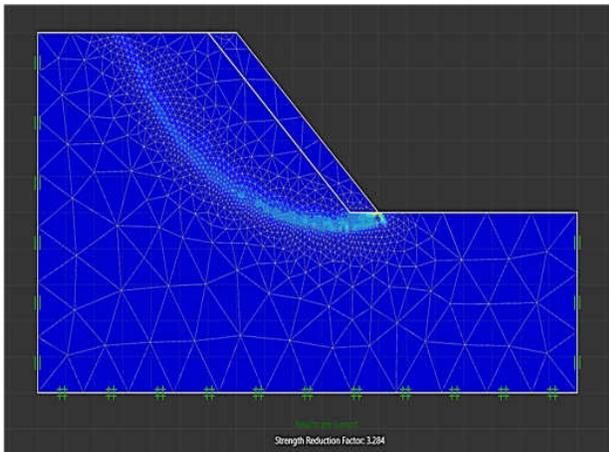


Figura 6. Disipación de falla cortante con vegetación en la superficie de inclinación del talud (caso 2).

Otro de los escenarios analizados corresponde a la presencia de árboles en el pie del talud, de este modo se logró estudiar el incremento en el factor de seguridad. En la teoría se indica que las raíces de los árboles en este sitio del talud logran brindar un aporte significativo a la estabilidad, a diferencia de otros sitios del talud que pudieran generar un efecto negativo.

Entre los resultados obtenidos, se concluyó que las raíces que alcanzaban una profundidad de 2m generaron un aporte significativo al factor de seguridad, a diferencia de las que solamente alcanzaban 1m de profundidad (ver figura 7).

Tomando lo anterior en cuenta, se seleccionaron los escenarios en donde las raíces alcanzaban 2m de profundidad. Es importante destacar que las raíces que alcanzaban esta profundidad atravesaban la superficie de falla del talud (caso

3), lo cual es la razón de su incremento en el factor de seguridad (ver figura 8).

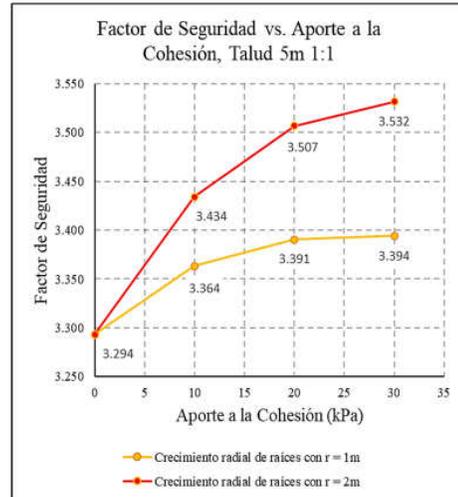


Figura 7. Comparativa del radio de raíces para talud de 5m con pendiente 1:1 (caso 3).

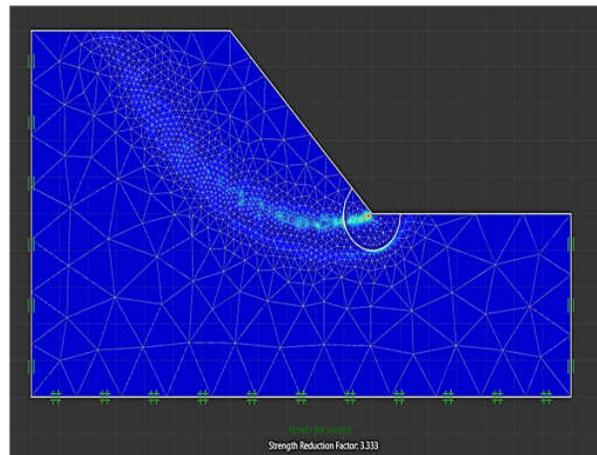


Figura 8. Disipación de falla cortante con árbol en pie del talud.

En la figura 8, se muestran los resultados obtenidos para un talud de 5m con pendiente 1:1 (caso 3), en donde se tomaron en cuenta 3 escenarios en los cuales las variables a destacar eran la distancia entre el centro de raíces al pie del talud (d) y el aporte a la cohesión por parte de las raíces. En el gráfico se muestra que el incremento en el factor de seguridad se encuentra condicionado principalmente por la distancia "d", por lo que se destaca la importancia de la ubicación del árbol para obtener los resultados esperados.

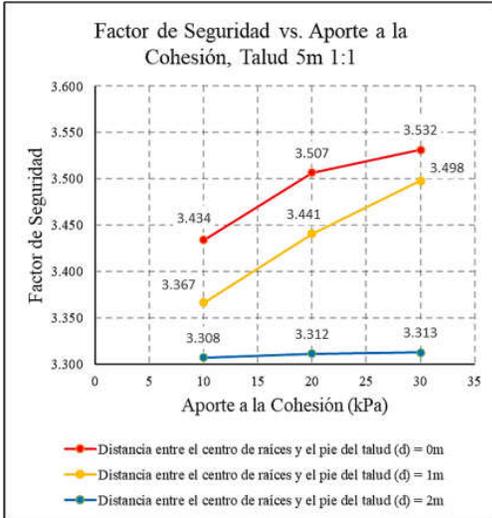


Figura 8. Resultados para Talud de 5m con pendiente 1:1 (caso 3).

En la figura 9, se muestran los resultados para un talud de 15m con pendiente 1:1 (caso 4), al igual que en el análisis del talud de 5m se evaluó el efecto de la distancia “d”. En este escenario se pudo observar una disminución en el incremento del factor de seguridad, por lo que se deduce que a partir de los 15m en adelante los efectos de las raíces no son tan significativos.

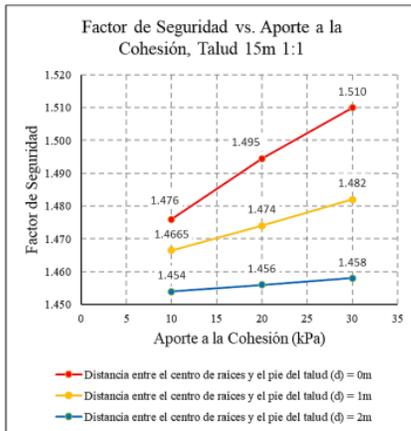


Figura 9. Resultados para Talud de 15m con pendiente 1:1 (caso 4).

En la figura 10, se muestran los resultados para un talud de 25m con pendiente 1:1 (caso 5). Con los valores obtenidos en este escenario se pudo concluir que la altura es un aspecto muy importante que tomar en cuenta antes de emplear técnicas de estabilización biotécnica, ya que como se ha demostrado que la geometría del talud puede definir los efectos positivos o negativos de la practica empleada.

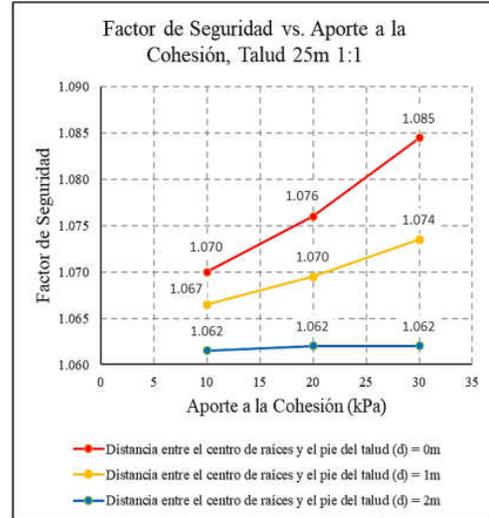


Figura 10. Resultados para Talud de 25m con pendiente 1:1 (caso 5).

5. Opinión experta: estado de la práctica de la bioingeniería de taludes en Panamá

Cuando se trata de obras civiles que se ejecutan a partir de contratos con el estado panameño, la ejecución de estas debe regirse de acuerdo con lo establecido en las Especificaciones Técnicas del Ministerio de Obras Públicas. En el Capítulo 30 correspondiente a “Control de Erosión” se señala el tema de la revegetación, además de establecerse los parámetros y normativas que rigen la implementación de este método de control de erosión. El proyecto de la Ciudad de Panamá [22], la estabilización de taludes mediante colocación de especies vegetales limita por lo general al control de erosión mediante la implementación de hidrosiembra, gramas tipo Toro, Pastos tipo Braquiaria y del tipo Vetiver. Cuando se ven involucrados taludes inestables por su geometría, se utilizan métodos como muros de contención, colocación de gaviones, estabilización mecánica, entre otros.

Un alto porcentaje de los deslizamientos de taludes en Panamá se deben a procesos erosivos, principalmente ocasionados por la precipitación, razón por la cual se ha producido un aumento en la implementación de vegetación para el control de erosión. En diferentes zonas de Panamá, se puede observar la implementación de este tipo de técnicas en distintos proyectos del Ministerio de Obras Públicas (MOP), como, por ejemplo: la colocación de grama vetiver en la Autopista Arraiján – La Chorrera, la colocación de hidrosiembra en taludes ubicados en el Corredor Norte, entrada a Betania y la colocación de grama tipo Toro en la rehabilitación de la Carretera Nuevo México – Puerto Corotú.

La experiencia práctica apunta a que la remoción de vegetación, principalmente de arbustos o árboles con raíces relativamente profundas, genera una disminución importante en la estabilidad de los taludes, lo cual produce como consecuencia la ocurrencia de deslizamientos tales como los que se han producido en los Puntos Críticos de la rehabilitación de la Carretera Panamericana en Darién, Tramo 4: Canglón - Yaviza. Todo esto es indicativo de que las raíces aportan a la resistencia al corte del suelo, con lo cual, es importante tomar en cuenta la colocación de arbustos y árboles en zonas estratégicas, ya que podría influir positivamente en la estabilidad de taludes [22].

El aporte que generan las raíces depende estrechamente del buen desarrollo de la especie a colocar, por esta razón sería más adecuado optar por especies nacionales ya que estas están adaptadas al clima y a los factores característicos del clima en Panamá.

Para colocación en la parte inferior de taludes, resulta recomendable optar por especies de árboles frutales, puesto que la morfología que presentan sus raíces es generalmente fuerte y profundas. Sin embargo, es importante tomar en cuenta el peso adicional a producir por el árbol durante la etapa de producción de frutos. Adicionalmente, la profundidad y la fortaleza de las raíces depende de las condiciones del entorno, las especies frutales oriundas de Panamá se caracterizan por su desarrollo tanto en zonas urbanas con altos niveles de contaminación, como en zonas rurales y suburbanas con bajos niveles de contaminación [23].

Los árboles frutales tienen la capacidad de retener grandes cantidades de agua, con lo cual, es posible inferir que existe una modificación en el porcentaje de humedad del suelo, evitando la saturación de este. Por otro lado, la colocación de especies frutales tiene un impacto positivo en el factor económico y comercial de la zona en la que se coloca, gracias a la fácil comercialización de las frutas [23]. Las especies más recomendadas, tomando en cuenta los factores antes mencionados son: el nance, el tamarindo, la guaba y el mamón.

En el caso de requerir refuerzo en la sección media del talud, conviene ser cautelosos al seleccionar el tipo de árbol, ya que en sus secciones intermedias la potencial superficie de falla pudiera extenderse a mayor profundidad que las raíces. Generalmente se recomienda utilizar arbustos pequeños de maderas livianas.

6. Recomendaciones para la estabilización de taludes utilizando bioingeniería

A partir de los estudios realizados, las opiniones expertas obtenidas y la bibliografía realizada, resulta conveniente ponderar la utilización de algunas especies (nativas o previamente introducidas) vegetales en Panamá. Al momento, es claro que la revegetación de taludes mediante el uso de hierbas y pastos es una técnica ya ampliamente utilizada. Sin

embargo, existe la posibilidad de incluir la utilización de arbustos e incluso árboles, siempre y cuando el proceso de plantación se lleve a cabo de manera organizada y con adecuados planes de mantenimiento y poda. Las siguientes secciones describen de manera general las características y beneficios de algunas de las especies estudiadas.

6.1 *Leucaena (Leucaena Leucocephala)*

Esta especie se considera un árbol pequeño o en algunos casos un arbusto (Fig 11), el cual, según fuentes bibliográficas, puede crecer desde 3 hasta 20 metros de altura [19], [20], [24], [25], sin embargo, Jiménez y Espino [25] ha documentado especímenes de hasta 8 metros de altura en Panamá. Posee un sistema de raíces significativamente profundo, pudiendo extenderse hasta 3 o 4 metros de profundidad [20]. Se ha documentado su utilización para estabilización de taludes [26].

La especie es originaria de Guatemala, México y Belice, sin embargo, se encuentra actualmente en Panamá [24], [25], [27]. Su contribución a la componente cohesivo-resistente al corte en suelos ha sido previamente documentada por múltiples autores, los cuales documentan que se producen aumentos en cohesión de hasta 400% con respecto a un suelo sin refuerzo después de 12 meses de sembrado [17].

6.2 Casco de Vaca (*Bauhinia Variegata/Purpurea*)

Ambas especies (*Bauhinia variegata* y *Bauhinia purpurea*) son árboles pequeños los cuales oscilan entre 5 a 10 metros de altura (figura 12) [29] y se han reportado especímenes con sistemas de raíces de aproximadamente 4 metros de profundidad [30]. La resistencia al cortante de suelos reforzados con raíces ha sido estudiada por Haji Ali y Osman [17], y se ha comprobado que las contribuciones a la cohesión son importantes (aumento de 10 kPa en 12 meses).

Adicionalmente a los beneficios aportados a la resistencia mecánica del suelo, la especie es visualmente atractiva, lo cual podría representar un valor agregado durante la revegetación de algunos taludes.



Figura 11. Fotografía de *Leucaena Leucocephala* [28].

6.3 Achiote (*Bixa Orellana*)

El achiote (figura 13) es un árbol pequeño de lento crecimiento el cual puede durar hasta 50 años. La altura de los arbustos suele oscilar entre 3 y 10 metros [31], aunque con adecuada poda es posible mantenerlos con alturas menores y en estado productivo. Diversas fuentes literarias clasifican sus raíces como fasciculadas o pivotantes, alcanzando en algunos casos entre 3 y 4 metros de profundidad [20]. La madera del achiote es particularmente liviana y frágil, lo cual lo convierte en un espécimen atractivo para refuerzo de taludes ya que representa un peso relativamente despreciable en comparación con el refuerzo que provee al talud. De hecho, se ha reportado que, en combinación con otras plantas, el achiote se puede plantar exitosamente en pendientes inclinadas y quebradas [31]

En cuanto al aporte a la resistencia cortante en suelos, Haji Ali y Osman [17] documentaron que las contribuciones a la cohesión del suelo son de carácter moderado en comparación con la *leucaena leucocephala* y la *bauhinia purpurea*, sin embargo, es importante tomar en cuenta que dicho estudio fue realizado para un período de 6 y 12 meses después de la plantación, por lo cual presumiblemente las plantas ensayadas no habían alcanzado una altura y desarrollo final. Es por esta razón que dichos autores recomiendan el uso de la planta para efectos de control de erosión.

Una de las ventajas significativas que presenta el achiote es que su semilla constituye un producto de uso habitual en la cocina autóctona de Panamá, por lo cual resultaría en una solución práctica con un valor agregado, para aquellos quienes utilizan el producto.



Figura 12. Fotografía de Bauhinia Variegata/Purpurea [28].

6.4 Árboles frutales

Tal como fue discutido en la sección 5, la utilización de árboles puede resultar beneficiosa para efectos de mejorar el factor de seguridad en taludes.

Los árboles frutales en particular ofrecen la ventaja de que absorben grandes cantidades de agua, lo cual es indicador de que pudieran funcionar como reguladores de la saturación en dicha zona. Sin embargo, el posicionamiento de los mismos debe ser estudiado cuidadosamente, puesto que la gran mayoría suelen alcanzar grandes tamaños, y su remoción posterior pudiera ser no adecuada para el talud.

Los resultados de la simulación numérica realizada como parte de este estudio sustentan el hecho de que la colocación de sistemas radiculares en el pie del talud pudiera resultar en un incremento en la resistencia cortante en dicha zona, lo cual como consecuencia produciría un mejor factor de seguridad contra deslizamiento.

Las recomendaciones obtenidas como parte de esta investigación corresponden a la opinión de profesionales con muchos años de experiencia en el tema de estabilización, revegetación y reforestación de taludes [22], [23]. Entre las especies frutales recomendadas se contemplan los árboles de nance (*Byrsonima crassifolia*), tamarindo (*Tamarindus indica*), Guaba (*Inga spectabilis*) y mamón (*Melicoccus bijugatus*).

De estas cuatro especies sugeridas, Silva-Orozco [20] ha documentado que el nance, guaba y mamón, poseen sistemas de raíces muy profundas. Sin embargo, otras fuentes [33] reportan que el árbol de guaba tiende a retener la humedad en los suelos. Por ende, resulta recomendable considerar primeramente los árboles de nance y mamón.

La opinión de expertos en la materia indica que la absorción de agua producida por árboles frutales pudiera contribuir a regular la saturación del suelo, lo cual conlleva en efecto positivo al momento de evaluar los esfuerzos efectivos y la resistencia al cortante.

Sin embargo, los autores consideran que el mecanismo que más pudiera aportar resistencia global contra el deslizamiento es el anclaje producido por las raíces de árboles en el pie del talud, tomando en cuenta que, en la mayoría de los casos, es de esperar que estas atraviesen la potencial superficie de falla del sistema. Esta noción es consistente con los resultados encontrados mediante la simulación de elementos finitos y también con las recomendaciones presentadas por Khalilnejad et al. [1].

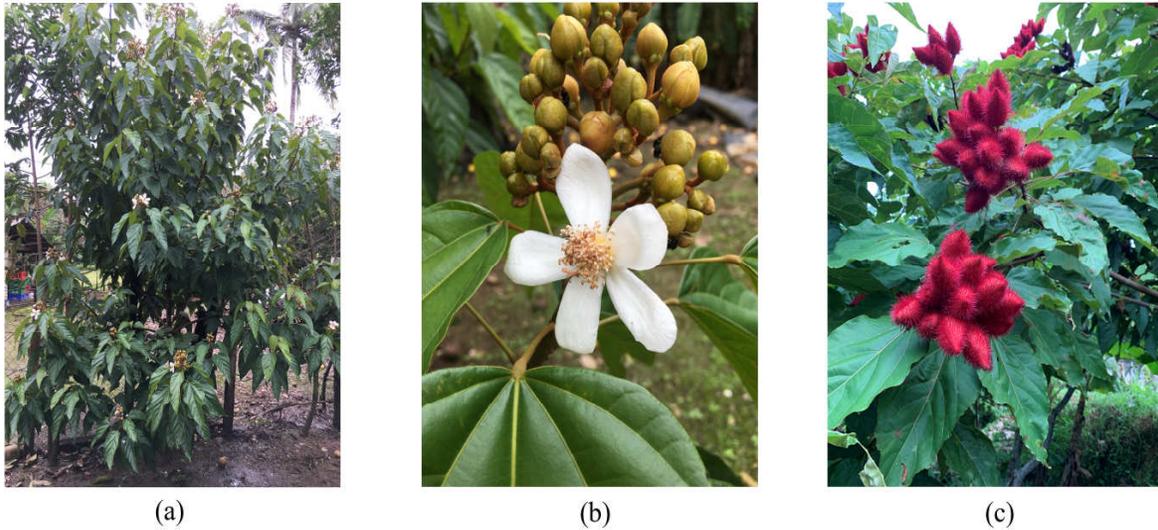


Figura 13: Fotografías de un arbusto de achiote: (a) Arbusto [32], (b) flor [32] y (c) fruto[28].

6.5 Comentarios sobre la distribución de especies a lo largo del talud

Tal como fue discutido en la sección 5, la utilización de árboles puede resultar beneficiosa para efectos de mejorar el factor de seguridad en taludes. Los análisis presentados sustentan la utilización de árboles o arbustos grandes en el pie del talud, y a su vez los mismos aparentan producir un aumento en el factor de seguridad del talud.

Sin embargo, existe un alto grado de incertidumbre en cuanto a la posible superficie de falla que el talud pueda experimentar en un momento dado. Es por esto por lo que no resulta adecuado realizar recomendaciones únicas acerca de la colocación de árboles o arbustos en las secciones medias del talud (i.e. a lo largo de la pendiente).

Se considera que la inclusión de pastos y arbustos pequeños como parte del sistema de revegetación pudiera colaborar positivamente en la prevención de deslizamientos traslacionales-superficiales, como también para control de erosión, siempre y cuando, se pueda garantizar que las raíces alcancen cierta profundidad.

Por otro lado, en el caso de deslizamientos profundos existe la posibilidad de que la superficie de falla del talud pase por debajo de las raíces, con lo cual el peso de los árboles y arbustos actuaría como fuerza desestabilizante en el sistema.

7. Conclusiones

El artículo presentado, contiene los resultados de una investigación analítica y documental, la cual llevaba por objetivo determinar de manera preliminar o conceptual, la viabilidad de utilizar arbustos y árboles como elementos de

refuerzo para taludes en zonas tropicales, con particular énfasis en la República de Panamá.

Se realizaron consultas con expertos de la industria, como también una revisión de estudios y resultados obtenidos en otros países de similar latitud a Panamá. Se realizó también una simulación numérica utilizando el método de los elementos finitos en dos dimensiones, con el fin de aproximar el aporte al factor de seguridad que pudiera proveer la colocación de un árbol, específicamente en el pie del talud.

Los resultados indican que, en efecto, la colocación de árboles en la parte baja del talud puede resultar en aportes importantes a la estabilidad del mismo. Estos resultados se encuentran en sintonía con sugerencias realizadas por investigadores en estudios anteriores. Sin embargo, es de importancia aclarar que los resultados obtenidos no son evidencia suficiente para emitir un juicio universal aplicable a todo tipo de taludes, con lo cual, es imprescindible la presencia de un profesional idóneo para implementar bioingeniería como opción integral para la estabilización de un talud.

Adicionalmente, se presenta información sobre especies que, basados en literatura y opinión experta, pudieran funcionar como elementos de refuerzo para las condiciones climáticas de Panamá. Algunos comentarios importantes son los siguientes:

- Las raíces de árboles proporcionan un aumento en la resistencia al corte, específicamente en la cohesión del suelo. La simulación numérica realizada considera la existencia de una zona radial de resistencia incrementada en el pie del talud, lo cual resulta en un incremento sustancial del factor de seguridad de este. Por tanto, se considera beneficiosa la colocación de árboles o arbustos

en esta posición. Estos hallazgos son consistentes con recomendaciones presentadas por [1].

- Las raíces de árboles y arbustos aportan a la resistencia al corte de los taludes, siempre y cuando las mismas alcancen el plano de falla del talud. Sin embargo, existen limitaciones e incertidumbre al estimar la profundidad de las raíces, y como también al momento de estimar la posible superficie de falla del talud. Por ello, se considera que la plantación de árboles de maderas livianas y arbustos pudiera contribuir positivamente a la estabilidad de taludes ante movimientos traslacionales (i.e. deslizamientos superficiales).
- No resulta adecuado emitir observaciones respecto a las fallas profundas (i.e. fallas circulares, logarítmicas, etc), por lo cual, es de vital importancia involucrar a profesionales idóneos al momento de seleccionar las especies de arbustos o árboles para revegetación de talud.
- En cuanto a la parte superior del talud, la literatura disponible sugiere considerar la revegetación con pasto, plantas florales o arbustos livianos con adecuada poda, de modo que las raíces puedan contribuir a la resistencia, sin que la planta represente un peso significativo al talud.
- Cuando se elige una especie por el sistema de raíces que ésta genera, es importante que el mismo sea de morfología fibrosa, profunda y preferiblemente radial o cilíndrica, lo que genera un aporte a la resistencia al corte en forma de un aumento en la cohesión de la zona en donde se ubican las raíces.
- Al momento de elegir las especies de árboles a utilizar se deben considerar diferentes factores, como, por ejemplo: impacto económico, disponibilidad de la especie en áreas cercanas, resistencia y adaptabilidad al clima, entre otros.
- El uso de especies frutales como el nance, el tamarindo y el mamón, pudieran ser alternativas para la colocación en el pie del talud. Igualmente, las leucaenas, bauhinias y el achiote se pueden considerar opciones viables para distintas zonas del mismo.

Los estudios realizados como parte de este proyecto de clase constituyen un primer paso en la investigación de los efectos positivos de la flora en la estabilización de suelos. Sin embargo, se considera que el uso de la bioingeniería para estabilización de taludes representa un campo de investigación atractivo, el cual puede constituirse en fuente de financiamiento para la realización de pruebas que permitan realizar recomendaciones más puntuales, basadas en resultados experimentales obtenidos en Panamá.

AGRADECIMIENTO

Los autores extienden un agradecimiento al Ingeniero Rubén Galván, jefe del Departamento de Ensayo de Materiales del Ministerio de Obras Públicas, y a los ingenieros Juan de

Dios Cedeño y Álvaro Fernández, de la Sección Ambiental del Ministerio de Obras Públicas de la República de Panamá.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] A. Khalilnejad, Faisal Hj. Ali, and N. Osman, "Contribution of the Root to Slope Stability," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 277–288, 2012.
- [2] R. P. C. Morgan and R. J. Rickson, *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach*. 2005.
- [3] J. Suarez, "La Vegetación y los Deslizamientos," in *Deslizamientos: Técnicas de Remediación*, 2009, pp. 291–312.
- [4] J. E. Douglas, "Effect of Species and Arrangement of Forests on Evapotranspiration," *Int. Symp. Hydrol.*, vol. 32, no. 3, pp. 179–180, 1964.
- [5] J. E. Norris, A. Stokes, S. B. Mickovski, E. Cammeraat, B. C. Nicoll, and A. Achim, *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. 2008.
- [6] K. M. Schmidt, J. J. Roering, J. D. Stock, W. E. Dietrich, D. R. Montgomery, and T. Schaub, "The variability of root cohesion as an influence on coast range," *Earth*, vol. 1024, pp. 995–1024, 2001.
- [7] T. H. Wu, W. P. McKinnell, and D. N. Swanston, "Strength of Tree Roots and Landslides on Price of Wales Island, Alaska," *Can. Geotech. J.*, 1979.
- [8] R. R. Ziemer, "Roots and Stability of Forested Slopes," *Eros. Sediment Transp. Pacific Rim Steeplands Proc Christchurch Symp.* January 1981, 1981.
- [9] C. O. Loughlin and R. R. Ziemer, "The Importance of Root Strength and Deterioration Rates Upon Edaphic Stability in Steepland Forests," *Proc. an IUFRO Work*, no. August 1982, pp. 70–78, 1982.
- [10] M. Budhu, *Soil Mechanics and Foundations*. 2010.
- [11] Optum CE, "Optum G2 User Manual," 2020. [Online]. Available: <https://optumce.com/products/brochure-and-datasheet/>.
- [12] R. Brenner, "A hydrological model study of a forested and a cutover slope," *Hydrol Sci J*, vol. 18, no. 2, pp. 125–144, 1973.
- [13] D. H. Gray, "Reinforcement and Stabilization of Soil by Vegetation," *J. Geotech. Eng. Div.*, vol. 100, no. 6, pp. 695–699, 1974.
- [14] D. Greenway, "Vegetation and slope stability," in *Slope Stability: geotechnical engineering and geomorphology*, New York, NY: Wiley, 1987, pp. 187–230.
- [15] N. Coppin and I. Richards, *Use of vegetation in civil engineering*. London: Butterworths, 1990.
- [16] D. H. Gray, "Influence of Vegetation on the Stability of Slopes," in *Vegetation and Slopes: Stabilisation, protection and ecology.*, Institution of Civil Engineers, UK, 1995, pp. 2–25.

- [17] F. Haji Ali and N. Osman, "Shear Strength of a Soil Containing Vegetation Roots," *Soils Found.*, vol. 48, no. 4, pp. 587–596, 2008.
- [18] M. Nordin Abdullah, N. Osman, and F. Haji Ali, "Soil-root Shear Strength Properties of Some Slope Plants," *Sains Malaysiana*, vol. 40, no. 10, pp. 1065–1073, 2011.
- [19] M. Saifuddin and N. Osman, "Rooting Characteristics of some Tropical Plants for Slope Protection," *J. Trop. For. Sci.*, vol. 28, no. 4, pp. 469–478, 2016.
- [20] A. Silva Orozco, "Guía práctica para la estabilización de taludes en los suelos de Costa Rica utilizando vegetación nativa," Universidad de Costa Rica, 2013.
- [21] C. Maffra, R. Sousa, F. Sutili, and R. Pinheiro, "The effect of roots on the shear strength of texturally distinct soils," *Floresta e Ambient.*, vol. 26, no. 3, p. e20171018, 2019.
- [22] R. Galván, "Entrevista a Rubén Galván - Jefe del Departamento de Ensayos de Materiales del Ministerio de Obras Publicas 2019," 2019.
- [23] J. de D. Cedeño, "Entrevista a Juan de Dios Cedeño - Sección Ambiental del Ministerio de Obras Públicas," 2019.
- [24] Ministerio de Desarrollo Agropecuario, "Resultados de la Zonificación Agro-ecológica de 20 Especies de Pastos y Forrajes en la República de Panamá." República de Panama, 2009.
- [25] J. Jimenez and K. Espino, Guía de árboles y plantas arborescentes de la Universidad Tecnológica de Panamá, Extensión Tocumen. Panama City: Universidad Tecnologica de Panama, 2020.
- [26] V. Parera, "Leucaena for erosion control and green manure in Sikka," in *Proc. Leucaena Research in the Asian-Pacific Region*, 1982, pp. 169–173.
- [27] B. Guerrero, D. Herrera, and J. Frias, "Sistema Silvopastoril Leucaena Leucocephala en asocio con Cynodon dactylon (Alicia), en vacas de leche del Sistema de Doble Propósito." Instituto de Investigación Agropecuaria de Panama, 2013.
- [28] Smithsonian Tropical Research Insitute, "Smithsonian Tropical Research Institute." [Online]. Available: <https://stricollections.org/portal/>.
- [29] J. Sanchez de Lorenzo-Cáceres, "Notas sobre Bahuninia purpurea L., Bahuninia variegata L. y su híbrido Bahuninia x blakeana Dunn (Leguminosae-Caesalpinioideae)." 2014.
- [30] K. Verma, K. Sandeep, K. Rajesh, and C. Parkash, "Root structure, distribution and biomass in five multipurpose tree species of western himalayas," *J. Mt. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 519–525, 2014.
- [31] Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal de El Salvador, "Manual Técnico: El cultivo del achiote, Bixa Orellana L." .
- [32] T. Saavedra and C. Hernandez, "Fotografías de Achiote." Fumiales de Quebro, Panamá, 2019.
- [33] Autoridad del Canal de Panama, Manual de Reforestación: Especies Frutales. Panamá: Autoridad del Canal de Panamá, 2009.