

## **MODELACIÓN NUMÉRICA DE TALUDES REFORZADOS CON GUADUA**

**ELABORADO POR:**

**JOSÉ DAVID SARMIENTO TEJADA**

**TRABAJO DIRIGIDO**

**DIRECTORA:**

**ING. CATALINA LOZADA LÓPEZ**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**BOGOTA D.C**

**2021**

## Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	2
Figuras .....	4
Tablas .....	6
Ecuaciones.....	6
1. Introducción .....	7
2. Antecedentes y justificación .....	7
3. Marco teórico.....	10
3.1 Efecto de la vegetación en los taludes.....	10
3.1.1 Efectos hidráulicos e hidrológicos de la vegetación.....	12
3.1.2 Control de la erosión .....	16
3.1.3 Sobrecarga y fuerzas del viento generadas por la vegetación.....	17
3.1.4 Características y aporte mecánico de las raíces.....	18
3.1.5 Acción de refuerzo de las raíces.....	23
3.1.6 Estabilidad de taludes con vegetación .....	26
3.2 Uso de guadua para el reforzamiento de taludes.....	29
3.2.1 Trinchos en guadua .....	29
4 Planteamiento y formulación del problema .....	31
5 Objetivos .....	31
6 Metodología .....	31
7 Secuencia y tipo de actividades que se desarrollarán .....	32
8 Selección del tipo del suelo y variables a utilizar .....	33
8.1 Tipo del suelo .....	33
8.2 Variables de análisis .....	36
9 Modelación del problema usando SLIDE.....	38
9.1 Definición de la geometría del talud y pendientes .....	38
9.1.1 Modelación de pendientes para el suelo arcilloso.....	39
9.1.2 Modelación de pendientes para el suelo granular .....	41
9.2 Modelaciones de trinchos de guadua para los suelos seleccionados.....	43
9.2.1 Análisis de trinchos para suelos arcillosos .....	45
9.2.2 Análisis de trinchos para suelos granulares .....	47
9.2.2.1 Análisis inicial Z=1,4m .....	47
9.2.2.2 Análisis con Z=1,9m.....	49

9.2.2.3	Análisis con $Z=0.9m$ .....	50
9.2.2.4	Análisis de conjunto de datos .....	52
10	Conclusiones.....	54
11	Bibliografía .....	55
12	ANEXO .....	57

## Figuras

Ilustración 1: graduales en el eje cafetero. Fuente: (Mateus 2014) .....	8
Ilustración 2: Tipos de vegetación en taludes. Fuente: (Downs 2013) .....	11
Ilustración 3: Propiedades de la vegetación en los taludes. Fuente:(Downs and Zilbert 2010) .....	12
Ilustración 4: Interceptación de la lluvia por la vegetación. Fuente: (Morales 2017) .....	13
Ilustración 5: Esquema del efecto de la vegetación sobre el modelo hidrológico subsuperficial. Fuente: (Juarez Diaz 1998) .....	14
Ilustración 6: Control de la erosión vegetal. Fuente: (Fernández 2015).....	17
Ilustración 7: Esquema de la fuerza de tracción del viento. Fuente: (Juarez Diaz 1998).....	17
Ilustración 8: Tipos de raíz. Fuente: (Juarez Diaz 1998) .....	20
Ilustración 9: Efecto de las raíces para el control de deslizamientos poco profundos. Fuente: (Gray and Ohashi 1983) .....	22
Ilustración 10: Esquema de esfuerzos generado por las raíces en un suelo. Fuente: (Green line Gardens 2018) .....	23
Ilustración 11: Fuerza de anclaje de arbustos y de hierbas de raíz profunda. Fuente: (Bache y Mackaskill, 1984).....	23
Ilustración 12: Efecto de arco de la vegetación Fuente: (Campos 1991).....	24
Ilustración 13: Tipos de anclaje de la superficie de falla por acción de las raíces (Tsukamoto and Kusakabe 1984). .....	25
Ilustración 14: Efecto de anclaje de las raíces. Fuente: (Hernández and Jiménez) .....	26
Ilustración 15: Esquema del análisis propuesto para calcular el factor de seguridad teniendo en cuenta el efecto de la vegetación. Fuente: (Juarez Diaz 1998).....	27
Ilustración 16: Entramado de raíces en un talud. Fuente: (Vojtasik, Chodacki, and Hochsmann 2014) .....	28
Ilustración 17: Aplicación de la bioingeniería para la restauración de un talud Fuente: (Downs 2013) .....	29
Ilustración 18: Forma de Construcción de un Trincho en Guadua con procedimiento de diseño en SLIDE Fuente: (Mateus 2014) .....	30
Ilustración 19: Limites de Atterberg para suelos típicos bogotanos Fuente: (Orozco 2006).....	33
Ilustración 20: Ensayos de exploración de suelos típicos bogotanos Fuente: (Orozco 2006) .....	34
Ilustración 21: Variables a ser analizadas. Adaptado de: (Mateus 2014) .....	37
Ilustración 22: Modelo de talud según las consideraciones tomadas. Fuente: Propia.....	38
Ilustración 23 : Ángulo del talud vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo arcilloso. Fuente: Propia. ....	40
Ilustración 24: Modelo seleccionado para suelos arcillosos. Fuente: Propia. ....	41
Ilustración 25: Ángulo del talud vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo arcilloso. Fuente: Propia. ....	42
Ilustración 26: Modelo seleccionado para suelos granulares. Fuente: Propia. ....	43
Ilustración 27: Espaciamiento (m) vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo arcilloso. Fuente: Propia. ....	46
Ilustración 28: Espaciamiento (m) vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo granular H=1.4m. Fuente: Propia. ....	48
Ilustración 29: Espaciamiento (m) vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo granular H=1.9m. Fuente: Propia. ....	49

Ilustración 30: Envoltorio de falla para 0.9m y Z=0.9m .....	51
Ilustración 31: Espaciamiento (m) vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo granular H=0.9m. Fuente: Propia. ....	52
Ilustración 32: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 6.3° .....	57
Ilustración 33: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 18.4° .....	57
Ilustración 34: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 29.1° .....	58
Ilustración 35: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 37.9° .....	58
Ilustración 36: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 48° .....	58
Ilustración 37: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 59° .....	58
Ilustración 38: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 69.4° .....	59
Ilustración 39: modelo de suelo granular con pendiente de 6.3° .....	59
Ilustración 40: modelo de suelo granular con pendiente de 18.4° .....	59
Ilustración 41: modelo de suelo granular con pendiente de 29.1° .....	59
Ilustración 42: modelo de suelo granular con pendiente de 37.9° .....	59
Ilustración 43: modelo de suelo granular con pendiente de 48° .....	60
Ilustración 44: modelo de suelo granular con pendiente de 59° .....	60
Ilustración 45: modelo de suelo granular con pendiente de 48° .....	60
Ilustración 46: Talud 0.3m de espaciamento en arcilla. ....	61
Ilustración 47: Talud 0.6m de espaciamento en arcilla.....	61
Ilustración 48: Talud 0.9m de espaciamento en arcilla. ....	62
Ilustración 49: Talud 1.2m de espaciamento en arcilla.....	62
Ilustración 50: Talud 1.5m de espaciamento en arcilla.....	62
Ilustración 51: Talud 0.3m de espaciamento y H=1.4m G. ....	63
Ilustración 52: Talud 0.6m de espaciamento y H=1.4m G. ....	63
Ilustración 53: Talud 0.9m de espaciamento y H=1.4m G. ....	63
Ilustración 54: Talud 1.2m de espaciamento y H=1.4m G. ....	63
Ilustración 55: Talud 1.5m de espaciamento y H=1.4m G. ....	64
Ilustración 56: Talud 0.3m de espaciamento y H=1.9m G. ....	64
Ilustración 57: Talud 0.6m de espaciamento y H=1.9m G. ....	64
Ilustración 58: Talud 0.9m de espaciamento y H=1.9m G. ....	65
Ilustración 59: Talud 1.2m de espaciamento y H=1.9m G. ....	65
Ilustración 60: Talud 1.5m de espaciamento y H=1.9m G. ....	65
Ilustración 61: Talud 0.3m de espaciamento y H=0.9m G. ....	66
Ilustración 62: Talud 0.6m de espaciamento y H=0.9m G. ....	66
Ilustración 63: Talud 0.9m de espaciamento y H=0.9m G. ....	66
Ilustración 64: Talud 1.2m de espaciamento y H=0.9m G. ....	66
Ilustración 65: Talud 1.5m de espaciamento y H=0.9m G. ....	67

## Tablas

Tabla 1: Características de la guadua angustifolia .....	8
Tabla 2: Valores de Et/Eo para diversas coberturas vegetales .....	15
Tabla 3: Componentes de la planta y sus funciones. ....	16
Tabla 4: Ensayos de resistencia a la tensión de algunas raíces de plantas tropicales de Colombia. ....	21
Tabla 5: Rango de datos para suelos bogotanos según diversas profundidades .....	34
Tabla 6: Datos iniciales de cada capa .....	35
Tabla 7: Cohesión de cada capa del suelo.....	35
Tabla 8: Datos del suelo arcilloso a usar en SLIDE .....	35
Tabla 9: Datos del suelo granular a usar en SLIDE .....	36
Tabla 10: Ángulos y dimensiones seleccionadas para los cálculos. ....	39
Tabla 11: Resultados de factor de seguridad por Bishop simplificado para cada ángulo de pendiente. ....	39
Tabla 12: Resultados de factor de seguridad por Bishop simplificado para cada ángulo de pendiente. ....	41
Tabla 13: resistencias al corte y compresión de la guadua angustifolia. ....	44
Tabla 14: Resistencia al corte usado para el modelo. ....	44
Tabla 15: cantidad de trinchos en los modelos para cada espaciamiento. ....	45
Tabla 16: F.S. para variación de trinchos a la profundidad de 1.4m para el suelo arcilloso. ....	45
Tabla 17: Calculos porcentuales para suelo arcilloso.....	46
Tabla 18: F.S. para variación de trinchos a la profundidad de 1.4m para el suelo granular. ....	47
Tabla 19: F.S. para variación de trinchos a la profundidad de 1.9m para el suelo granular. ....	49
Tabla 20: F.S. para variación de trinchos a la profundidad de 0.9m para el suelo granular. ....	50
Tabla 21: Resumen de F.S. presentados en los modelos .....	53
Tabla 22: Análisis de datos para modelos granulares. ....	53

## Ecuaciones

Ecuación 1: Lluvia interceptada .....	12
Ecuación 2: Fuerza de viento.....	18
Ecuación 3: Tensión de la raíz .....	22
Ecuación 4: Distanciamiento entre trinchos .....	30
Ecuación 5: Índice de plasticidad .....	35
Ecuación 6: Índice de plasticidad .....	35
Ecuación 7: Cohesión de cada capa .....	35
Ecuación 8: F.S. para ángulos de taludes en suelos arcillosos. ....	40
Ecuación 9: F.S. para ángulos de taludes en suelos granulares. ....	42
Ecuación 10: Resistencia al corte usada en el modelo.....	44
Ecuación 12: F.S. en talud reforzado según espaciamiento para suelo arcilloso.....	46
Ecuación 13: F.S. en talud reforzado según espaciamiento para suelo granular con H=1.4m. ....	48
Ecuación 14: F.S. en talud reforzado según espaciamiento para suelo granular con H=1.9m. ....	50
Ecuación 15: F.S. en talud reforzado según espaciamiento para suelo granular con H=0.9m. ....	52

## 1. Introducción

Los taludes naturales o artificiales son vulnerables ante la acción del agua y el movimiento de masas, generando panoramas críticos donde estos fallan, por ello se utilizan estructuras civiles o naturales que ayuden a prevenir potenciales riesgos. La construcción de estructuras para estabilizar el talud es de suma importancia para el área de la ingeniería civil, debido a que los taludes son una constante en las construcciones civiles como vías o en zonas aledañas a edificaciones. La estabilización realizada comúnmente en las obras genera grandes impactos en el medio ambiente. Por lo tanto, la bioingeniería se ha convertido en un foco de interés en el área, ya que con ella se pueden solucionar las problemáticas presentadas sin afectar de esta manera el medio ambiente que en algunos casos puede dar solución de forma más eficaz y económica que los métodos convencionales.

Los muros de contención son un método para reforzar el talud utilizando pantallas de material que se encargan de la estabilización de tramos del talud. La bioingeniería aporta a este método la guadua que es un material mecánicamente competente para construcciones y que presenta beneficios como su resistencia a plagas, su bajo costo comparado con muros de concreto o que, al pertenecer a la familia del pasto, puede ser cultivado cercano a la zona permitiendo un mantenimiento inmediato del material. El objetivo de este trabajo es analizar variables geométricas en la configuración de un talud de guadua que permitan el mejor uso de la guadua, mediante la modelación numérica realizada en el programa SLIDE.

## 2. Antecedentes y justificación

Al momento de estabilizar un talud se debaten diferentes métodos para poder lograr que el factor de seguridad sea lo suficientemente grande para que no suceda una falla, por ello se diseñan estructuras con el propósito de garantizar la estabilidad del talud. Estos métodos son muy fiables para la mayoría de los casos, pero tienen un problema fundamental que es el costo que requieren para su implementación, por ello la investigación de material vegetal para su estabilización es una alternativa que puede cumplir con su cometido. Al mismo tiempo, estas alternativas presentan un valor agregado y es que no presentan las soluciones convencionales, y es su bajo impacto ambiental.

La guadua es un material que puede ser usado como material de ingeniería debido a sus buenas propiedades mecánicas. En Colombia existe una especie de guadua llamada Guadua Angustifolia que según (Añazco 2014) presenta como característica principal que es seleccionada a nivel mundial como uno de los 20 mejores bambúes, debido a sus propiedades físicas y mecánicas, así como también su resistencia a ataques de insectos y hongos. A continuación, se pueden apreciar las características mecánicas que presenta el material:

Tabla 1: Características de la *guadua angustifolia*

Guadua Angustifolia				
Flexión (MPa)	Tensión paralela (MPa)	Compresión paralela (MPa)	Tensión perpendicular (MPa)	Corte paralelo (MPa)
37,4	40,7	20,3	1,7	3,5

Fuente: (Mateus 2014)

A continuación, se muestra una imagen donde se pueden apreciar guaduales que se encuentran en la región del eje cafetero colombiano.

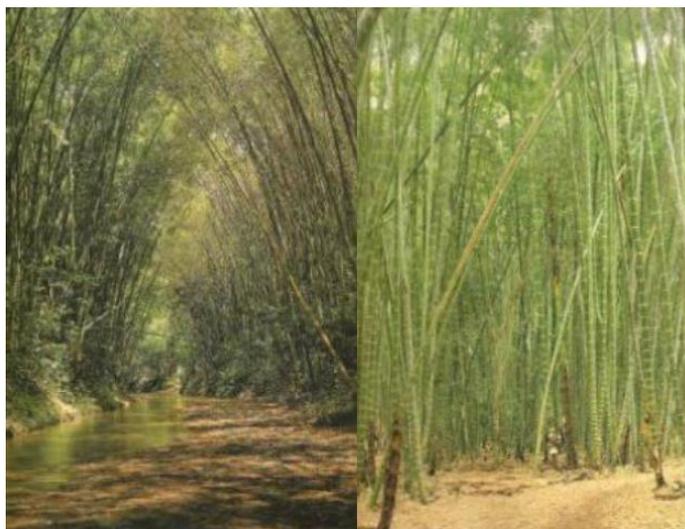


Ilustración 1: guaduales en el eje cafetero. Fuente: (Mateus 2014)

Según (Mateus 2014) los trinchos son estructuras formadas a partir de guadua o madera con el fin de generar muros, los cuales forman terrazas para estabilizar taludes que han sufrido procesos de deslizamientos o en donde hay procesos de cárcavas. En estos casos su finalidad es estabilizar el terreno para ayudar a que la vegetación se establezca nuevamente y acabe de estabilizar el talud de forma permanente por el amarre de raíces. También se utilizan para disipar energía cinética del agua de escorrentía, de acequias, quebradas y ríos, en donde la fuerza del agua provoca socavamiento de los cauces y bordes. Muchos de los trinchos construidos para estabilizar taludes terminan por colapsar a causa del mal anclaje en profundidad y un exceso de altura en superficie.

#### **Antecedentes nacionales:**

A nivel nacional es un método óptimo para estabilizar taludes como se muestra en los antecedentes 1 y 2, esto es debido a que Colombia es un país el cual tiene un tipo de guadua con unas propiedades mecánicas que benefician su uso como material de bioingeniería, además de ser una zona con grandes reservas ecológicas hay una alta aplicabilidad de la estabilización de los taludes utilizando material vegetal que no afecte el ecosistema.

- Antecedente 1:

En una investigación realizada por (Morales Herrera and Sarmiento Restrepo 2020) en Tóriba Cundinamarca se realizó un estudio con el propósito de controlar la erosión y meteorización en taludes utilizando como herramienta la guadua, la cual se seleccionó por las características de la zona que permiten hacer cultivos aledaño al área de intervención. El propósito de este era aplicar la bioingeniería para generar un talud escalonado que pudiera reducir la velocidad del agua que circula por la zona y del mismo modo estabilizar el talud para evitar posibles derrumbes, sedimentos y reducir la alteración del suelo por su interacción con el agua circulante.

- Antecedente 2:

Se realizó una investigación con el propósito de estabilizar taludes en el páramo de Sumapaz utilizando guadua para no afectar el ecosistema de la zona. Del estudio se obtuvieron los siguientes resultados:

“La implementación de las pantallas en Guadua brinda una nueva alternativa que aporta desempeño, eficiencia y sobre todo es amigable con el medio ambiente, dado que son pantallas vivas que después de realizar la excavación tanto de corte como relleno, queda como si la zona no hubiera sido afectada, porque permite la capacidad de resiliencia del suelo, adicional a esto se pretende que para este sitio en particular se planteen especies nativas de la zona para que la capacidad de recuperación sea mucho más rápida” (Hernández Bonilla 2018).

#### **Antecedentes internacionales:**

A nivel internacional también tienen una alta aplicabilidad estas estructuras debido a que el bambú y sus derivados, son de gran utilidad al momento de estabilizar taludes usando materiales amigables con el medio ambiente. A continuación, se presenta información encontrada del uso de guadua como estructura de contención en zonas semejantes a Colombia, las cuales presentan similares condiciones geográficas.

- Antecedente 3:

Según (Carmioli Umaña 2009) en un ayuntamiento de un municipio mexicano se desarrolló un programa para aprovechar las propiedades del bambú en la construcción de barreras, que se comportan de manera similar a muros de retención. Este proyecto fue implementado en zonas que presentaban alto riesgo de fallas en sus taludes, donde las características y lo accidentado del terreno dificultan la construcción de muros en otro material. En esta misma localidad también se conformaron taludes con la siembra de bambú, al reconocer que las raíces de esta planta son verdaderamente resistentes.

- Antecedente 4:

El Departamento de Conservación de Suelos y Ordenación de Cuencas Hidrográficas de Nepal aplica técnicas de bioingeniería para poder controlar la erosión, debido a su geografía que tiende a ser montañosa y geológicamente activa se puede tomar como un lugar semejante a Colombia. Estas técnicas no solo son apropiadas para la topografía de este país, sino también para el régimen de lluvias monzónicas que lo afectan. (Carmioli Umaña 2009)

- Antecedente 5:

Un estudio realizado por (Añazco 2014) para analizar la vulnerabilidad del bambú respecto al cambio climático aplicado a la costa de Ecuador y en el norte de Perú, utilizó a la especie *Guadua Angustifolia* como base de su investigación. Esta investigación obtuvo como resultados que la guadua utilizada como material constructivo es una excelente especie, ya que permite enfrentar el cambio climático de una mejor manera. También brinda beneficios al ecosistema brindando protección hídrica en bosques ribereños, captura de CO<sub>2</sub>, refugio para la biodiversidad, entre otros. Su uso puede convertirse en una alternativa válida para reemplazar la madera o para constituirse en el único material para construcción en determinadas áreas, generando una dinámica económica que permite crear empleos, constituye un aporte al desarrollo económico productivo de una región.

### 3. Marco teórico

#### 3.1 Efecto de la vegetación en los taludes

La vegetación toma un papel fundamental en la estabilidad de taludes y para su análisis se tienen en cuenta varios factores como: el volumen del follaje, su densidad de follaje, el tamaño, el ángulo de inclinación de las hojas, su aspereza, la altura total de la cobertura vegetal, la presencia de varias capas diferentes de cobertura vegetal, el tipo de raíces, su forma, la profundidad, el diámetro, la densidad, el cubrimiento y la resistencia que presenta el sistema.

El tipo de vegetación usada en el talud y en su área superior son parámetros importantes para determinar la estabilidad. La vegetación en estas zonas cumple dos funciones principales que son determinar el contenido de agua en la superficie y dar consistencia debido al entramado mecánico de sus raíces. En la siguiente ilustración se pueden apreciar los tipos de vegetación que se pueden encontrar en un talud:

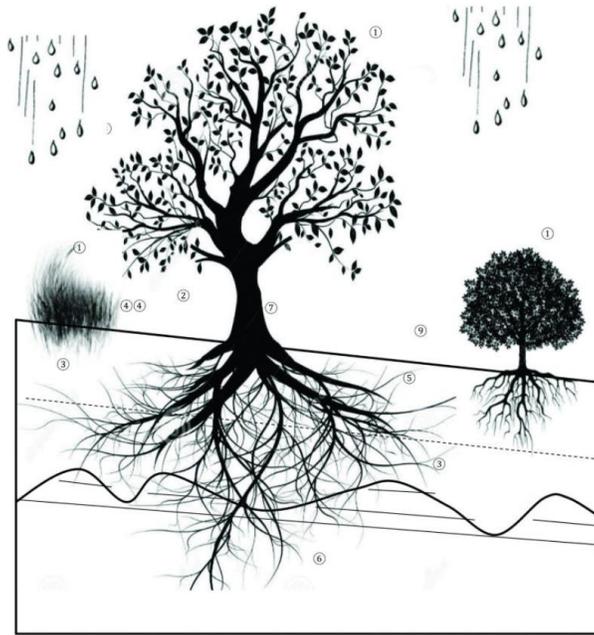


Ilustración 2: Tipos de vegetación en taludes. Fuente: (Downs 2013)

Según (Fernández 2015) los factores más importantes que aporta la vegetación son:

- Intercepta la lluvia
- Aumenta la capacidad de infiltración
- Extrae la humedad del suelo
- Grietas por desecación
- Raíces refuerzan el suelo, aumentando resistencia al cortante
- Anclan el suelo superficial a mantos más profundos
- Aumentan el peso sobre el talud
- Transmiten al suelo fuerza del viento
- Retienen las partículas del suelo, disminuyendo susceptibilidad a la erosión

La deforestación es una causa que puede afectar la estabilidad de un talud de varias formas como:

- Disminuyen las tensiones capilares de la humedad superficial
- Se elimina el factor de refuerzo de las raíces
- Se facilita la infiltración masiva de agua

Según (Juarez Diaz 1998) la quema de la vegetación es un factor fundamental para la inestabilidad de los taludes, especialmente si esto ocurre en áreas de coluviones en los cuales la vegetación ejerce un papel preponderante en la estabilidad, por la eliminación del refuerzo de las raíces y la exposición a la erosión acelerada. En la siguiente ilustración se muestra una descripción detallada de la interacción de la vegetación con los efectos hidrológicos, el control de la erosión, sobrecargas, fuerzas de viento, la caracterización y aporte de las raíces en el talud.

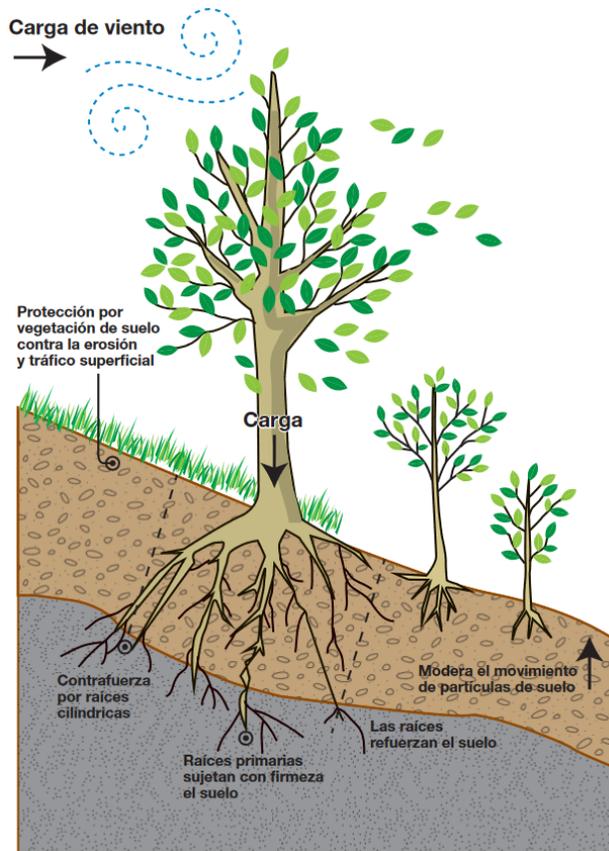


Ilustración 3: Propiedades de la vegetación en los taludes. Fuente:(Downs and Zilbert 2010)

### 3.1.1 Efectos hidráulicos e hidrológicos de la vegetación

El control de la hidrología y la hidráulica tiene gran influencia en la vegetación, esto es debido a que es una cobertura directa de precipitaciones interceptando la lluvia por medio de su follaje, así como también por los procesos vitales que realiza toda la vegetación que se encuentre en un talud.

#### Interceptación de la Lluvia

Según (Styczen and Moran 1996) cuando cae la lluvia en la superficie se analiza según dos panoramas, que son cuando la lluvia que cae directamente sobre el suelo y la lluvia que es interceptada por el follaje de la vegetación. Debido a esto se presenta la siguiente expresión para la lluvia interceptada:

$$\text{Lluvia interceptada} = \text{lluvia} * \% \text{Area de follaje}$$

Ecuación 1: Lluvia interceptada

La siguiente figura muestra que una parte de la lluvia que es interceptada se retiene y evapora, mientras que la otra alcanza finalmente la tierra por goteo o por flujo sobre las hojas y troncos

(escurrimiento cortical). Es importante que el análisis del tiempo entre la lluvia y el goteo para analizar el efecto hidrológico que se presenta en cada tipo de vegetación.

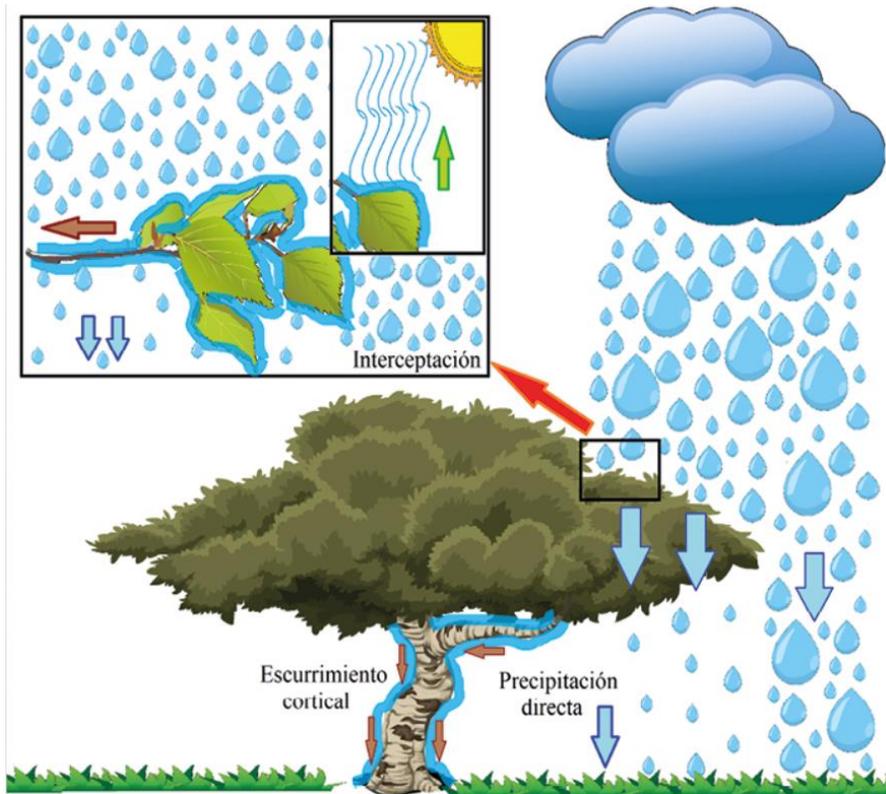


Ilustración 4: Interceptación de la lluvia por la vegetación. Fuente: (Morales 2017)

### Retención de Agua

La retención de agua en el follaje cumple la labor de modificar el ciclo hidrológico cuando se presenta una lluvia. Este fenómeno reduce el poder erosivo del agua, pero puede aumentar la infiltración. En la siguiente figura se muestra la variación el efecto hidrológico que presenta la vegetación a nivel subsuperficial.

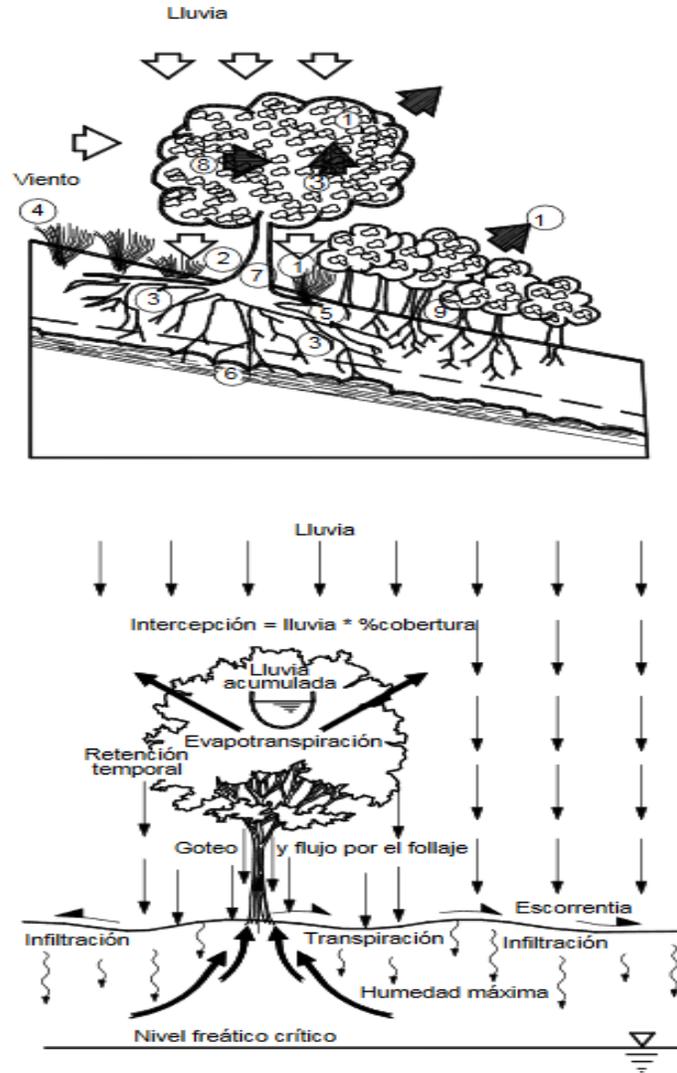


Ilustración 5: Esquema del efecto de la vegetación sobre el modelo hidrológico subsuperficial. Fuente: (Juarez Diaz 1998)

Según (Juarez Diaz 1998) la retención de agua en el follaje depende del tipo de vegetación, sus características y la intensidad de la lluvia. Los árboles de mayor volumen o densidad de follaje demoran más el ciclo hidrológico, ya que retienen por mayor tiempo las gotas de lluvia. En el caso de lluvias muy intensas la retención de agua es mínima, pero en el caso de lluvias moderadas a ligeras, la retención puede ser hasta de un 30%, dependiendo de las características que presente la vegetación.

El clima determina el efecto relativo de la vegetación para prevenir deslizamientos. En los climas para los cuales la precipitación es muy grande, el efecto de la cobertura vegetal sobre la estabilidad es mínimo y en áreas de clima árido la cobertura vegetal puede afectar en forma significativa la ocurrencia de deslizamientos (Rice and Krames 1970).

Parte del agua retenida es acumulada en el follaje para luego ser evaporada. Algunas especies vegetales como el maíz poseen espacios importantes para almacenamiento de agua.

El agua retenida no acumulada retorna a la tierra por goteo o flujo por el follaje. La rapidez de flujo depende de la aspereza de las superficies de las hojas y tronco, y los diámetros y ángulos de las hojas con la vertical.

### Evapotranspiración

La evapotranspiración es un efecto combinado de evaporación y transpiración que genera una disminución de la humedad en el suelo. Cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo tiene un potencial de evapotranspiración específico y se obtiene generalmente una humedad de equilibrio, dependiendo de la disponibilidad de agua lluvia y nivel freático.

La evapotranspiración puede ser medida utilizando la relación entre la evapotranspiración de la superficie cubierta por plantas y la de un cuerpo de agua expuesto  $E_t/E_o$ . Sus valores dependen de las condiciones ambientales y de la variedad de planta, de acuerdo con la siguiente tabla:

*Tabla 2: Valores de  $E_t/E_o$  para diversas coberturas vegetales*

<b>Especie Vegetal</b>	<b>Relación <math>E_t/E_o</math></b>
Eucalipto	1.5
Arroz	1.35
Palma de aceite	1.2
Cacao	1.0
Bosques	0.9
Ficus	0.9
Pastos	0.8
Papa	0.7
Caña de azúcar	0.73
Banano o plátano	0.70
Maíz	0.67
Algodón	0.63
Café	0.5

*Fuente: (Juarez Diaz 1998)*

Dichos valores corresponden al potencial de evapotranspiración en el momento en que la humedad del suelo es alta. A medida que disminuye la humedad del suelo la evapotranspiración disminuye.

La evapotranspiración profundiza los niveles de aguas freáticas y puede generar asentamientos en suelos arcillosos blandos y agrietamientos por desecación. Las partes de la planta tienen funciones diferentes según su aporte al proceso de evapotranspiración como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3: Componentes de la planta y sus funciones.

<b>Parte de la Planta</b>	<b>Función</b>
<b>Raíz</b>	<b>Anclaje, absorción, conducción y acumulación de líquidos.</b>
<b>Tallo</b>	<b>Soporte, conducción y producción de nuevos tejidos.</b>
<b>Hojas</b>	<b>Fotosíntesis, transpiración.</b>

Fuente: (Juarez Diaz 1998)

El balance de la infiltración y la evapotranspiración produce una determinada humedad, la cual debe ser comparada con la humedad requerida para saturación. La saturación del suelo es un estado crítico en un talud ya que disminuye las fuerzas de succión o presiones negativas de agua de poros, las cuales ayudan a la estabilidad. La vegetación en algunos casos produce el efecto de mantener la humedad por debajo del límite de saturación, generando directamente una mejora en la estabilidad de las laderas.

### 3.1.2 Control de la erosión

El efecto más importante de las plantas en los taludes es su labor en la protección contra la erosión, ya que esta es fundamental para todos los casos y varía para cada tipo de vegetación. La vegetación con mayor densidad de follaje amortigua más eficientemente el golpe de la lluvia y disminuye la erosión. En hierbas y pastos la densidad y volumen del follaje actúan como un colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía (Juarez Diaz 1998).

Como se muestra en la siguiente figura, el control de erosión afecta en mayor medida a árboles altos que en el caso de arbustos. Además, se ha encontrado que las hierbas o maleza protegen generalmente mejor contra la erosión que los pastos (Juarez Diaz 1998).

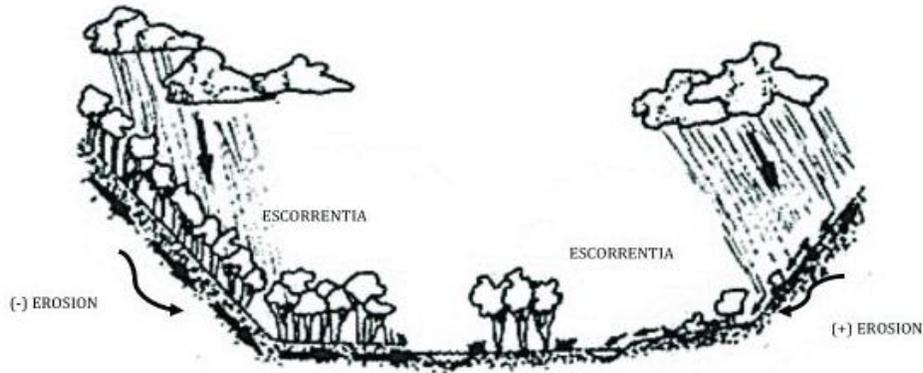


Ilustración 6: Control de la erosión vegetal. Fuente: (Fernández 2015)

### 3.1.3 Sobrecarga y fuerzas del viento generadas por la vegetación

Como se muestra en la siguiente figura, la sobrecarga debida al peso propio de la vegetación generalmente no representa una carga importante, pero las fuerzas del viento son significativas, esto es debido a que al impactar a los árboles generan un momento en el talud.

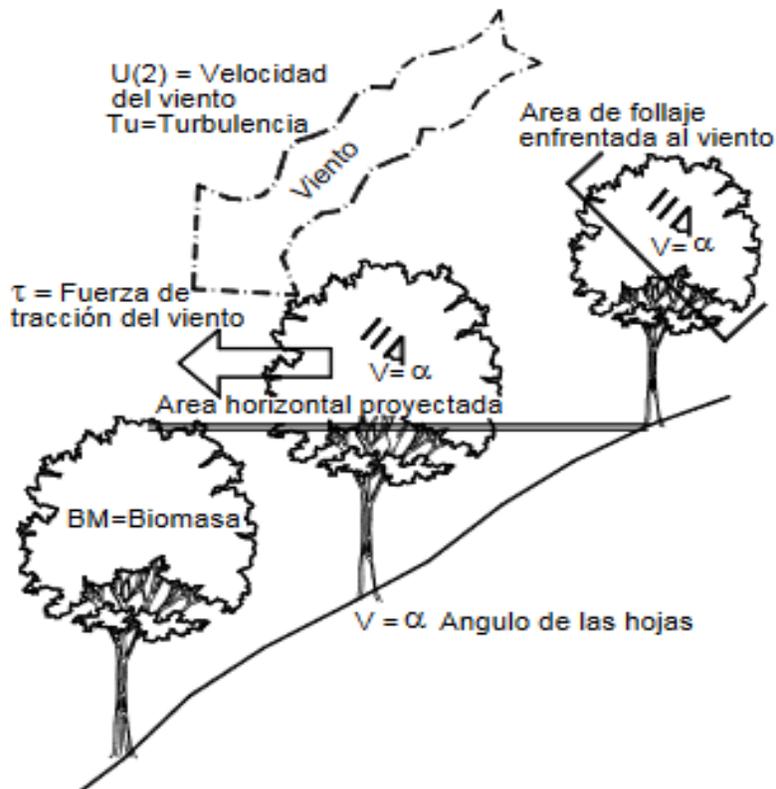


Ilustración 7: Esquema de la fuerza de tracción del viento. Fuente: (Juarez Diaz 1998)

Según (Styczen and Moran 1996) La fuerza de tracción generada por el viento puede calcularse utilizando una simplificación de la ecuación de Navier-Stokes.

$$\tau = 1/2 \rho_a \mu (z_0)^2 CD$$

*Donde:*

$\tau$  = Fuerza de tracción por unidad de área horizontal de la vegetación

$\rho_a$  = Densidad del aire (0.00123 Mg/m<sup>3</sup> al nivel del mar)

$\mu$  = Velocidad media del viento a la altura de z

$z_0$  = Altura efectiva de la rugosidad del follaje

$z_0 \cong 0.1H$  para árboles

H = Altura media de los árboles

CD = Coeficiente de tracción

*Ecuación 2: Fuerza de viento*

El valor de CD varía con la altura de la vegetación, rugosidad del follaje y velocidad del viento. A mayor velocidad CD disminuye. Para árboles CD varía de 0.01 a 0.10 con un valor típico de 0.05.

### **Efectos negativos añadidos**

- En ocasiones la vegetación puede traer efectos negativos como es la apertura de grietas en los macizos rocosos (Tsutiya 1991).
- Algunas plantas favorecen el mantenimiento de la humedad en el suelo, como es el caso de las plantaciones de Banano. Se pueden producir cambios en la infiltración por la construcción de terrazas o hileras para la siembra.
- El sistema de siembra a lo largo de las líneas de nivel, como es costumbre en las zonas cafeteras de Colombia, favorece la infiltración del agua de escorrentía, minimizando el transporte de suelo por erosión, pero facilitando la formación de niveles freáticos altos y de grandes deslizamientos.
- En Colombia, la ocurrencia de deslizamientos es mayor en áreas cultivadas que en los bosques naturales.
- Debe tenerse en cuenta que cuando las lluvias son muy intensas y de larga duración, el efecto de la vegetación sobre el ciclo hidrológico es mínimo. El efecto, sin embargo, es muy importante en áreas con regímenes moderados de lluvias (Walker and Mohen 1987).

### **3.1.4 Características y aporte mecánico de las raíces**

Las raíces son una parte fundamental de la planta ya que esto determina la sujeción que tendrá en el terreno. Los principales factores que determinan el desarrollo de las raíces son:

- Disponibilidad de nutrientes en el suelo
- Disponibilidad de oxígeno
- Contenido de humedad
- Succión o presión osmótica
- Temperatura del suelo
- Niveles de toxinas y elementos patogénicos

- Sistema de poros

Las características de las raíces dependen de la especie vegetal, la edad, las propiedades del perfil de suelo y el medio ambiente.

### **Profundidad de las Raíces**

La profundidad de las raíces generalmente no supera los cinco metros en árboles grandes, dos metros en los arbustos y 30 centímetros en los pastos.

La extensión lateral del sistema radicular que presenta una planta generalmente es mayor que su profundidad y en algunos casos supera los 50 metros de longitud.

La longitud de las raíces y su profundidad deben evaluarse para determinar su efecto sobre la estabilidad de un talud. Según (Watson and O`Loughlin 1990) el tamaño de las raíces de un pino Monterrey de 25 años con una extensión de raíz lateral de 10.4 metros, alcanzaba una profundidad máxima de solamente 3.10 metros y un promedio de 2.4 metros.

La longitud de las raíces es mayor cuando el árbol se encuentra en un suelo bien drenado granular, que cuando se encuentra en un suelo arcilloso. Aparentemente, este efecto se debe a la necesidad que el árbol tiene de buscar agua en el caso de que el drenaje sea bueno.

Ante la dificultad de poder determinar con precisión la longitud de raíz debido a la poca información existente sobre las características radicales de las diversas especies, se puede tomar como regla general que la raíz se extiende lateralmente 1.5 veces el radio de la corona del follaje, aunque debe tenerse en cuenta que, en algunos casos, las raíces pueden extenderse hasta 22 veces el radio de la corona.

La profundidad de refuerzo de las raíces de los pastos es de solo 20 centímetros comúnmente, pero algunas especies tienen profundidades que permiten el anclaje a mantos de roca relativamente profundos.

### **Forma del Sistema de Raíces**

Como se muestra en la siguiente figura, la forma de las raíces presenta tres tipos de variaciones:

- Raíz de extensión lateral: en la mayoría de los casos la extensión lateral de las raíces es mucho mayor que la profundidad, con excepción de plantas que presenten raíces pivotantes. El anclaje que genera esta raíz es principalmente paralelo a la superficie del terreno; sin embargo, no debe desestimarse la penetración de las raíces en las fisuras de la roca, anclando el suelo superficial o el efecto de anclaje en los dos primeros metros de suelo.
- Raíz de extensión radial: tienen la ventaja de profundizarse y al mismo tiempo extenderse lateralmente, generando efecto de arco, el cual es muy importante en la estabilización de deslizamientos poco profundos.
- Raíz pivotante: Consiste en una raíz vertical profunda centrada con ramificaciones de raíces pequeñas.

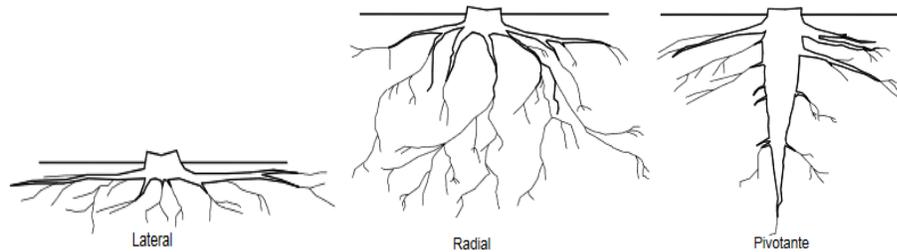


Ilustración 8: Tipos de raíz. Fuente: (Juarez Diaz 1998)

### Resistencia del Sistema Suelo – Raíces

La variación en la resistencia del suelo que es aportada por las raíces presenta variaciones en los textos científicos. A continuación, se muestran algunos ejemplos de estos casos:

- Las raíces aumentan la resistencia al cortante por incremento de la cohesión aparente del suelo, reportando incrementos de resistencia hasta de 3 a 4 veces (Gray 1974).
- Mediante pruebas de laboratorio se encontró que no existe prácticamente ninguna variación en el ángulo de fricción y la cohesión por la presencia de raíces o el aumento del porcentaje volumétrico de raíces en el suelo (Yagi 1994).
- La orientación de las raíces en un ángulo de 60 grados con la superficie de cortante aumenta a un máximo la resistencia al cortante equivalente a la dirección principal de tensión, lo cual se entiende como una resistencia generada por la tensión en las raíces (Gray and Ohashi 1983).
- La resistencia a la tensión de las raíces puede ser hasta el 30% de la del acero según (Schiechtl 1980) y pueden extenderse varios metros por debajo de la superficie del talud.
- La resistencia promedio a la tensión de las raíces depende de las características y estructura de la planta y puede variar desde 1300 psi hasta 7000 psi (Burroughs and Thomas, 1976; Gray, 1978 and Turmanina, 1965).

Las raíces que presentan los árboles y los arbustos poseen un comportamiento a la tensión con un bajo módulo de elasticidad y según (Gray and Ohashi 1983) no se rompen durante el proceso de corte del suelo; sin embargo, ensayos realizados con raíces en Colombia muestran deformaciones a rotura muy compatibles con el comportamiento al cortante de los suelos en la mayoría de las raíces ensayadas, especialmente en raíces con diámetro superior a 1 mm. El porcentaje de deformación a la rotura disminuye al aumentar el diámetro para las raíces de la mayoría de las especies ensayadas. Los datos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4: Ensayos de resistencia a la tensión de algunas raíces de plantas tropicales de Colombia.

Espece	Deformación Máxima (%)	Deformación Mínima (%)	Carga de Tensión Máxima (Kg/cm <sup>2</sup> )	Carga de Tensión Mínima (Kg/cm <sup>2</sup> )
Bambusa vulgaris	15.79	14.25	386.69	276.10
Espondias mombin	15.16	7.38	366.41	76.84
Licania tomentosa	10.70	3.83	576.86	360.65
Swinglea glutinosa	11.48	6.72	633.01	0.60

Fuente: (Gray and Ohashi 1983)

Según (Gray and Ohashi 1983) Las raíces de mayor diámetro dan generalmente, menores valores de resistencia a la tensión en las mismas condiciones; sin embargo, al realizar pruebas con raíces de diferente árbol, pero del mismo tipo o variedad, los resultados de resistencia a la tensión pueden variar hasta en un 500%, lo cual dificulta la asignación de una resistencia específica para elaborar un modelo matemático. Además del diámetro se debe tener en cuenta la longitud de las raíces individuales, ya que estas aumentan su resistencia a medida que ellas son más largas. En la siguiente figura se muestra el efecto de las raíces para el control de deslizamientos poco profundos.

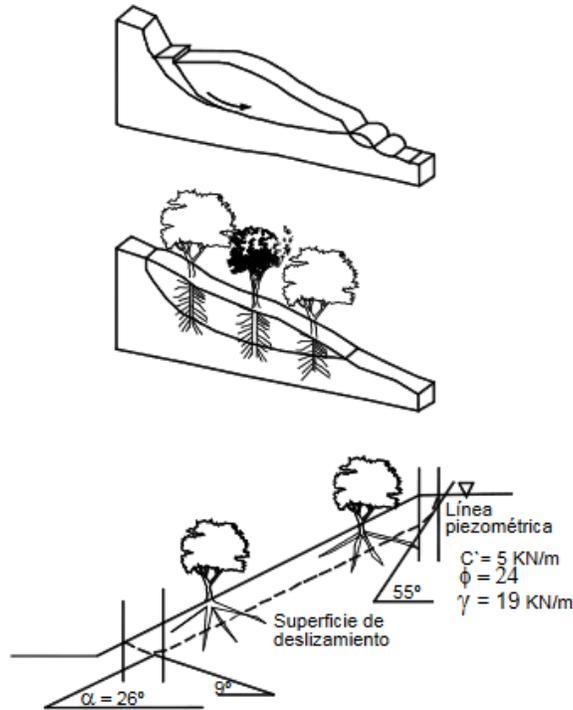


Ilustración 9: Efecto de las raíces para el control de deslizamientos poco profundos. Fuente: (Gray and Ohashi 1983)

La relación entre la resistencia a la tensión de la raíz y su diámetro puede expresarse en la forma de una simple ecuación logarítmica:

$$T_r = nD^m$$

Donde:

$T_r$  = Resistencia a la tensión de la raíz

$D$  = Diámetro

$n$  y  $m$  = Constantes empíricas que se deben determinar para cada especie de árbol

Ecuación 3: Tensión de la raíz

Dicha ecuación genera una resistencia a la tensión para una planta en condiciones normales, pero también se deben tener en cuenta otras variables para medir la tensión como la edad del árbol y sus condiciones ambientales (clima, humedad, suelo, etc.), ya que producen un cambio importante en la resistencia a la tensión de las raíces.

La resistencia al arrancamiento es otro elemento importante para analizar en una raíz. En pruebas de arrancamiento en campo generalmente, la raíz se rompe y no se deja arrancar y al observar fallas de arrancamiento por fuerza del viento en la mayoría de los casos, el suelo es arrancado con la mayor parte del sistema radicular y la falla a rotura de las raíces ocurre sobre una superficie en la cual la densidad de raíces es menor, solo en algunas ocasiones las raíces profundas son arrancadas.

### 3.1.5 Acción de refuerzo de las raíces

Las raíces funcionan sobre todo por adaptación; sólo en terrenos ideales y de gran profundidad se posibilita el desarrollo de la genética de cada especie. Durante toda la vida de un árbol sus raíces crecen buscando las posibilidades del terreno. En este aspecto son muy importantes las raíces exploradoras, que a partir de su éxito desarrollarán las raíces absorbentes, las de transporte y las de sostenimiento o anclaje que además funcionan como almacén de reservas. Todo este entramado genera en el suelo esfuerzos y tenciones en toda la zona donde se realice el arraigo de la planta. En la siguiente figura se observan el esquema de esfuerzos generado por las raíces en el suelo.

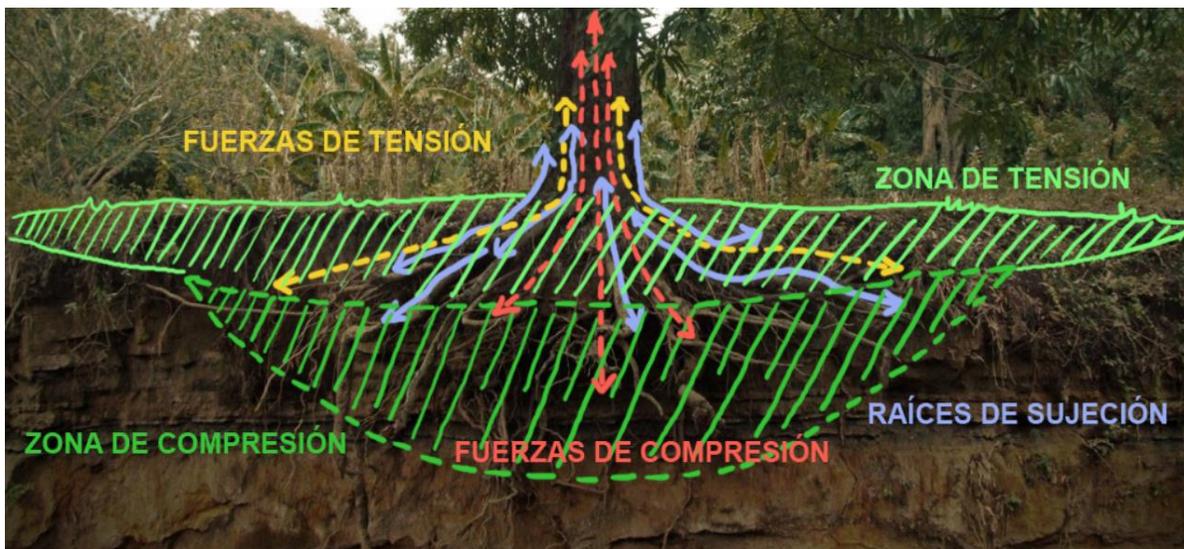


Ilustración 10: Esquema de esfuerzos generado por las raíces en un suelo. Fuente: (Green line Gardens 2018)

En la siguiente figura se muestra un esquema de las fuerzas que refuerzan las raíces refuerzan la estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades.

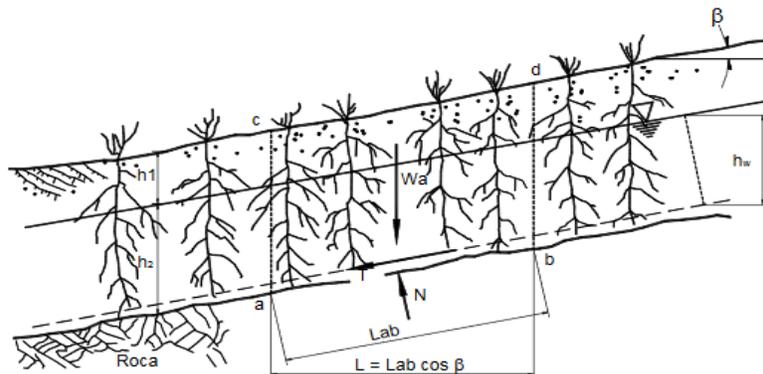


Ilustración 11: Fuerza de anclaje de arbustos y de hierbas de raíz profunda. Fuente: (Bache y Mackaskill, 1984).

Según (Juarez Diaz 1998) el efecto de las raíces sobre la resistencia del suelo se explica en tres formas:

- Unir materiales de los suelos inestables a mantos más estables. Este efecto es más pronunciado donde la superficie crítica de falla se encuentra en la zona de raíces.
- Formar una red densa entretrejida en los primeros 30 a 50 cms de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.
- Unir los grupos de partículas impidiendo la ocurrencia de pequeños deslizamientos.

Ensayos realizados por (Campos 1991) arrojan los siguientes resultados:

- las raíces aumentan la cohesión de muestras de suelo en gran proporción.
- Las raíces individuales actúan como anclajes que estabilizan los arcos de suelo que se extienden a través del talud. Las raíces actúan como pilas de refuerzo.
- El sistema radicular de un árbol, en forma conjunta con otros árboles puede formar efectos de arco, similares a los de las pilas o pilotes.

Debido a que las redes de raíces se extienden hacia afuera y adentro desde el árbol, es muy importante determinar la influencia del tipo de especie, tamaño, espaciamiento, etc. Para tener información de la distribución espacial de la resistencia aportada por las raíces. A continuación, se presenta una figura donde se muestra la influencia generada por el efecto arco de la vegetación en el terreno.

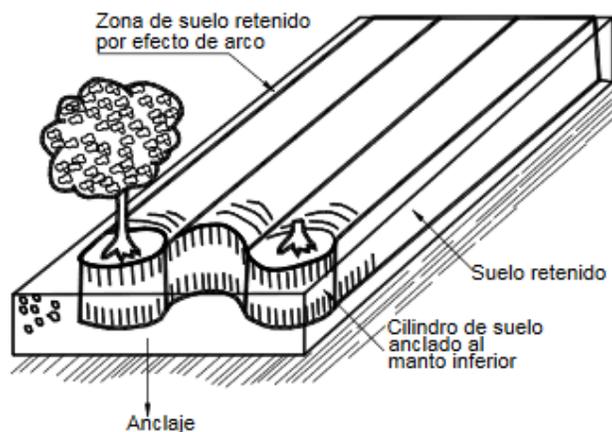


Ilustración 12: Efecto de arco de la vegetación Fuente: (Campos 1991)

### Clasificación del sistema de refuerzo

Como se muestra en la siguiente figura, se muestra la clasificación del refuerzo de taludes con las raíces de los árboles fue propuesta por (Tsukamoto and Kusakabe 1984), donde especifican los siguientes 4 tipos:

- TIPO A: Taludes que poseen una capa muy delgada de suelo sobre roca masiva y sin defectos que permitan puntos de anclaje para las raíces y una superficie de falla potencial entre el suelo y la roca.
- TIPO B: Una capa delgada de suelo sobre una roca con fracturas o defectos que permiten la entrada y anclaje de las raíces.

- TIPO C: Varias capas de suelo y las raíces penetran normalmente las interfaces, reforzando los contactos entre las diversas capas.
- TIPO D: Taludes con una capa gruesa de suelo y raíces a profundidades superiores a las de las superficies potenciales de falla.

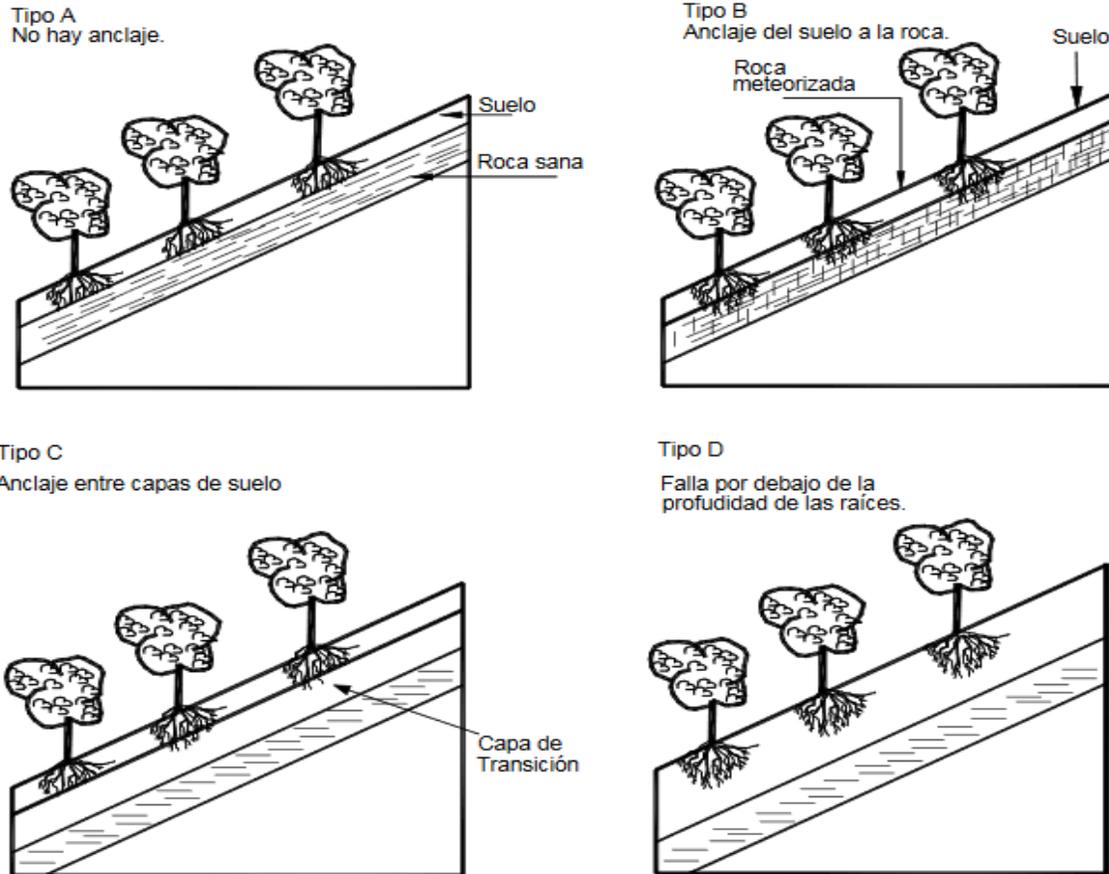


Ilustración 13: Tipos de anclaje de la superficie de falla por acción de las raíces (Tsukamoto and Kusakabe 1984).

### Efecto de Anclaje

Un efecto positivo muy importante es el “anclaje” de masas de suelo por las raíces. Las características físicas de las raíces determinan el efecto de anclaje o refuerzo del suelo, y la densidad del sistema radicular mejora la retención de las partículas o masas de suelo, aumentando la resistencia a la erosión (Tsukamoto and Kusakabe 1984).

El fenómeno del efecto de refuerzo de las raíces debe estudiarse en una forma global, analizando la superficie de falla al cortante de un talud, pudiéndose observar dos elementos principales:

- La movilización de la resistencia a la tensión de las raíces por efecto de anclaje de las raíces a materiales más resistentes. Este efecto es muy importante en perfiles de poco espesor de suelos residuales, en los cuales las raíces se anclan en la roca o en los materiales menos meteorizados.
- La profundización de la superficie crítica de falla en profundidades por debajo del volumen de presencia densa de raíces. Este efecto es importante en perfiles de suelo de gran espesor.

A continuación, se muestra el efecto de anclaje de las raíces en los horizontes de un suelo residual.

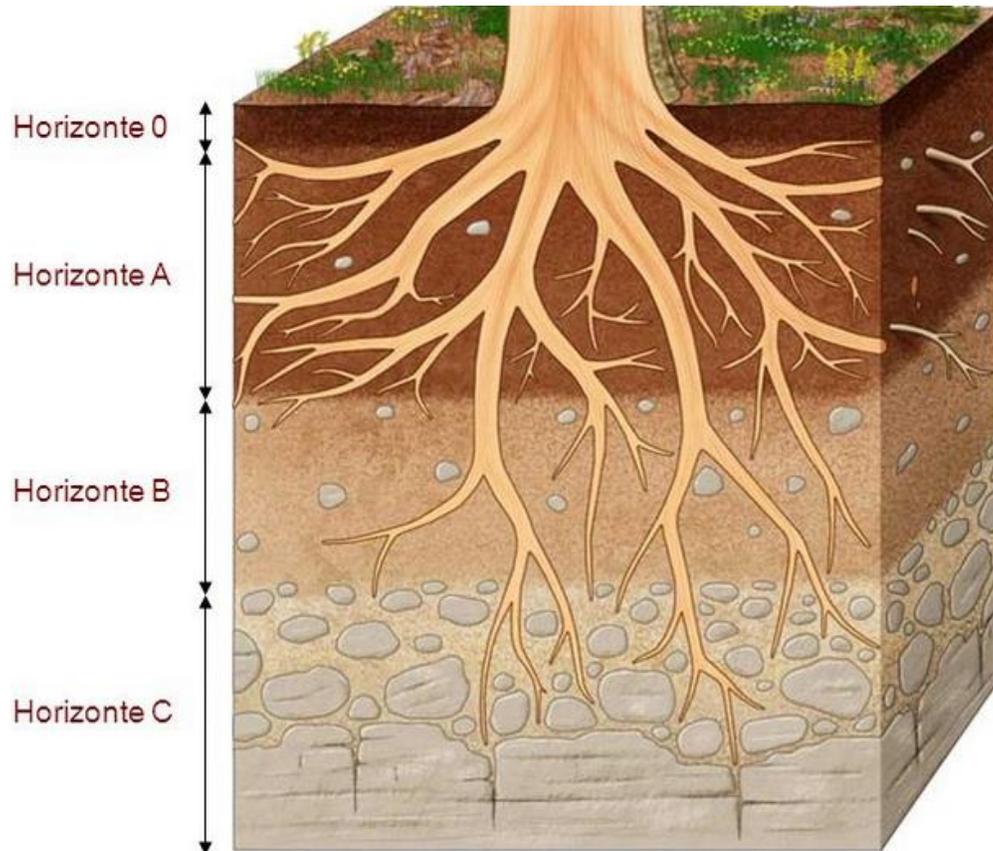


Ilustración 14: Efecto de anclaje de las raíces. Fuente: (Hernández and Jiménez)

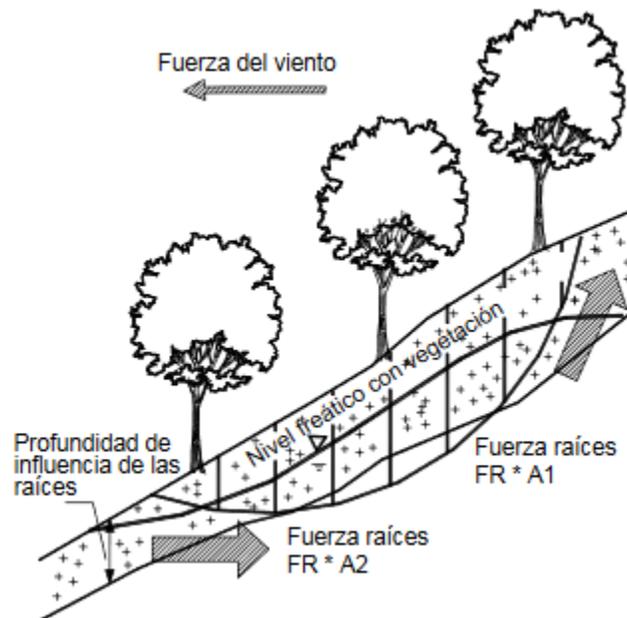
### Efecto de Arco

Para reducir el riesgo de movimientos, el espaciamiento de los árboles debe ser lo más cercano posible. Un árbol junto a otro puede generar un efecto de arco. Sin embargo, no se requiere que las raíces se entrelacen y el efecto de arco puede lograrse con separaciones de raíces entre 3 y 10 m dependiendo de las características del material del talud y del tipo de árbol. Una separación de 10 m entre árboles de grandes raíces produce soporte sustancial en la mayoría de los casos.

### 3.1.6 Estabilidad de taludes con vegetación

La vegetación cumple dos funciones importantes; primero, disminuye el contenido de agua en la parte superficial y subterránea por medio del aporte hidrológico e hidráulico, y en segundo, da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces. Teniendo en cuenta que las plantas toman el agua que necesitan del suelo en que crecen, se pueden plantear varios criterios para seleccionar el tipo de especies más conveniente en un caso dado; desde luego, el uso de plantas propias de la región será en principio recomendable y evitara fracasos posibles en la adaptación al ambiente de

especies importadas, fracasos que son difíciles de prever para un ingeniero civil; pero hay especies que toman demasiada agua del suelo y otras que toman mucho menos, produciendo grados muy diferentes de abatimiento en los contenidos de agua superficiales. En suelos arcillosos, seguramente pueden convenir más las primeras, al garantizar una corteza de suelo más resistente, pero en suelos arenosos un secado intenso en la superficie hace a los materiales más erosionables y ello no es conveniente (Juarez Diaz 1998). En la siguiente figura se ilustran las fuerzas generadas por la vegetación en el talud.



*Ilustración 15: Esquema del análisis propuesto para calcular el factor de seguridad teniendo en cuenta el efecto de la vegetación.  
Fuente: (Juarez Diaz 1998)*

De acuerdo con las investigaciones de (Yagi 1994), para fallas a poca profundidad para dos casos específicos en Japón, el factor de seguridad de acuerdo con el modelo de análisis propuesto por Enoki aumentó de 10% a 13.5%, para niveles altos de densidad de vegetación.

Un caso específico es Hong Kong, (Greenway 1987) reporta un aumento del 33% en el factor de seguridad para un talud con árboles de aproximadamente 10 m de altura y 3 m de profundidad de las raíces, utilizando el método de análisis de (Janbú 1973). El efecto analizado en este caso fue el de profundización de la superficie crítica de falla de 1.0 a 2.5 m. Se presenta una figura donde se puede apreciar el entramado de raíces que se generan por la acción de un árbol en un talud.



*Ilustración 16: Entramado de raíces en un talud. Fuente: (Vojtasik, Chodacki, and Hochsmann 2014)*

Cuando se trata de arbolado en los coronamientos de los cortes o como barreras contra invasión de arena, las consideraciones anteriores no son muy validas y el criterio debe quizás circunscribirse al uso de las especies locales que tengan mejores posibilidades de adaptación el lugar específico de que se trate.

La experiencia ha probado que es más efectivo para defender taludes la plantación continua de plantas herbáceas, en vez de la plantación de matas o áreas aisladas. El costo de ambas soluciones también es diferente, la actitud del ingeniero debe quedar condicionada a la feracidad de la región; hay zonas en que la forestación se reproduce en forma casi natural e inevitable, otras en que es muy difícil el crecimiento vegetal. La plantación aislada incrementa mucho la posibilidad de infiltración y escurrimiento. Por otra parte, en el caso de terraplenes muy altos ha dado buen resultado la plantación de arbustos en hileras, para hacer perder velocidad al agua que escurra (Rodríguez and Castillo 2006).

Es muy importante el efecto del pasto para evitar la formación de grietas de contracción en los suelos que estarían expuestos de no existir tal cobertura. En la siguiente figura se muestra la aplicación de la bioingeniería en un talud usando pasto.



Ilustración 17: Aplicación de la bioingeniería para la restauración de un talud Fuente: (Downs 2013)

### 3.2 Uso de guadua para el reforzamiento de taludes

Los taludes son vulnerables ante la acción del agua y el movimiento de masas lo cual tiene a hacer que fallen, por ello se utilizan estructuras civiles o naturales que ayuden a prevenir potenciales riesgos.

Guadua angustifolia, popularmente denominada guadua o tacuara, es una especie botánica de la subfamilia de las *gramíneas Bambusoideae* (bambú). Es un pasto que presenta características benéficas para la bioingeniería, esto es debido a que tiene propiedades de resistencia mecánica lo suficientemente altas como para realizar estructuras con ella, además es un tipo de planta que puede crecer en periodos de tiempo rápidos, que están comprendidos entre unos pocos meses o años para alcanzar la resistencia necesaria para soportar las cargas a las que pueda ser sometida. La guadua no es un material isotrópico, pero se pueden medir algunas características básicas como lo son: la resistencia última, el módulo de elasticidad, la densidad, el contenido de humedad natural, entre otros (Mateus 2014).

La guadua es un material de origen natural, esto genera que sus propiedades físicas y mecánicas varíen de acuerdo con su edad; según (Mateus 2014), guaduas con edades entre 3 y 6 años se consideran “maduras”, es decir, su resistencia está completamente desarrollada y son aptas para la conformación de elementos estructurales. La guadua utilizada en la construcción de edificaciones debe contar con algún procedimiento de preservación, que para el caso de Colombia se encuentran registrados en la Norma Técnica Colombiana NTC5301.

#### 3.2.1 Trinchos en guadua

Los trinchos de guadua son estructuras dispuestas en forma de muro formando terrazas con el objetivo de estabilizar taludes que presenten potenciales fallos. La finalidad es poder poner en las terrazas material vegetal que termine de proteger el talud por medio del entrelazamiento de las raíces.

Según (Mateus 2014) deben excavarse en zanjas a una profundidad de por lo menos 1,4 a 2m para poder ubicar los trinchos, esto es debido a que estas profundidades mínimas se considera que el trincho obtiene el anclaje necesario para evitar su falla. Sobre el fondo de la zanja, se clavan los postes verticales de sostén, que deben quedar anclados como mínimo 1,2 m por debajo del nivel inferior de la zanja. En superficie estas estructuras no deben ser mayores de 50 cm, Incluso pueden quedar totalmente enterradas. A continuación, se muestran condiciones para diferentes casos:

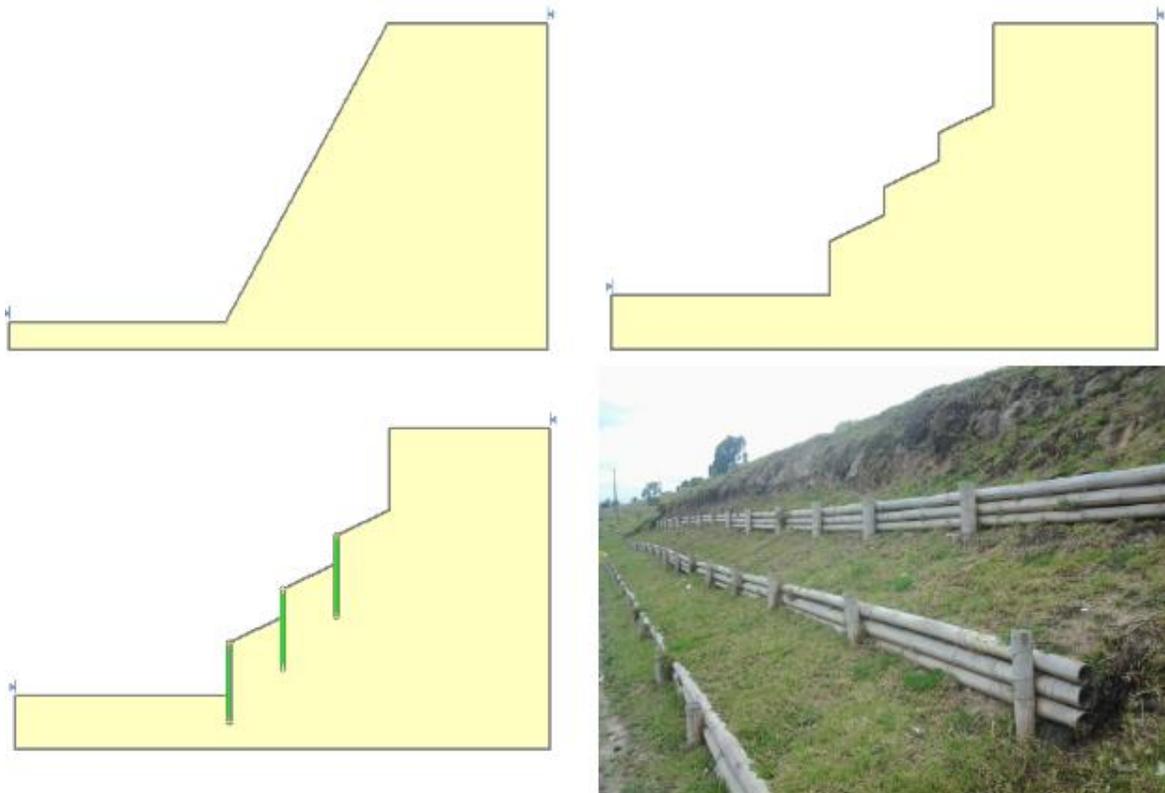
- Cuanto mayor sea la pendiente del terreno y/o la profundidad a la que se encuentra el suelo firme, mayor será la profundidad que se debe usar para que se genere un anclaje.
- En terreno de pendiente leve y/o que presente suelo firme a poca profundidad, los trinchos pueden tener un anclaje entre 50 y 70 cm.

La distancia entre trinchos es otra variable importante que se debe determinar. Según (Mateus 2014) se puede utilizar la siguiente ecuación para calcular el espaciamiento:

$$\text{Distanciamiento} = \frac{\text{Altura del trincho desde el terreno}}{\text{pendiente del talud}}$$

*Ecuación 4: Distanciamiento entre trinchos*

A continuación, se muestra un modelo de SLIDE donde se muestra la instalación de trinchos en un talud:



*Ilustración 18: Forma de Construcción de un Trincho en Guadua con procedimiento de diseño en SLIDE Fuente: (Mateus 2014)*

## 4 Planteamiento y formulación del problema

Los métodos de bioingeniería usados para la estabilización de taludes usando material vegetal en Colombia son válidos hasta alturas no mayores que 2500 msnm, esto es debido a que la estabilización utilizando pasto que presente raíces lo suficientemente largas para entrelazarse a profundidades considerables no se puede adaptar a los climas que se presentan a las altitudes especificadas, por lo que se debe recurrir a opciones que no son válidas de aplicación. Para afrontar estos problemas se aplicarán trinchos de guadua en un suelo con características similares a las presentadas en Bogotá-Colombia. El tipo de guadua a utilizar es la *Guadua Angustifolia* la cual se cultiva en el país y tiene propiedades mecánicas que le permiten ser usada con propósitos bioingenieriles.

El problema radica en poder encontrar variables de la colocación de trinchos para modificar y así poder determinar cuál es el rango en la que estas deberían ubicarse para que la estructura funcione de la forma más optima posible.

## 5 Objetivos

### Objetivo específico:

- Realizar una modelación numérica de taludes reforzados con guadua.

### Objetivos generales:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la guadua como material de bio-ingeniería para la estabilización de taludes, para identificar las variables para realizar la modelación numérica en el software SLIDE.
- Realizar modelos en el software SLIDE variando la profundidad y el espaciamiento de la obra de bio-ingeniería en guadua según las variables identificadas.
- Analizar el impacto de la presencia de la guadua para su aplicación en la estabilidad de taludes utilizando el programa SLIDE.

## 6 Metodología

- A. Realizar una revisión bibliográfica que permita identificar las variables a modelar y las propiedades suelo de estudio para el talud.
- B. Establecer los rangos de las variables para realizar el análisis.
- C. Establecer las propiedades del suelo para realizar los modelos.

- D. Definir la geometría del talud y la pendiente para cada caso analizado.
- E. Investigar sobre los comandos básicos de SLIDE y aprender a usar el programa.
- F. Realizar un estudio paramétrico en el software SLIDE en donde se varíe la profundidad y el espaciamiento del refuerzo conformado por pilotes en guadua (trinchos).
- G. Analizar los resultados obtenidos con el software para establecer la relación de las variables estudiadas con el factor de seguridad.

## 7 Secuencia y tipo de actividades que se desarrollarán

- Actividad 1: Desarrollo teórico del informe.
- Actividad 2: Determinar de las variables a estudiar.
- Actividad 3: Determinar el tipo de suelo para modelar.
- Actividad 4: Afianzar el conocimiento del software SLIDE, realizando tutoriales.
- Actividad 5: Realizar modelos en SLIDE variando profundidad y espaciamiento de los pilotes en guadua.
- Actividad 6: Analizar los resultados obtenidos.
- Actividad 7: Escribir el documento.

### Cronograma:

Actividad 1	x	x	x	x													
Actividad 2			x	x	x												
Actividad 3			x	x	x												
Actividad 4						x	x										
Actividad 5								x	x	x	x	x					
Actividad 6													x	x	x		
Actividad 7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
Informes de Avance						x					x						x
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	

### Instalaciones y equipos:

- Computador
- Programa SLIDE

## 8 Selección del tipo del suelo y variables a utilizar

### 8.1 Tipo del suelo

La selección del suelo es una de las características principales para realizar el modelo de SLIDE y por ello se deben obtener datos que puedan caracterizar una zona más que un lugar en específico. Gracias a los datos brindados por (Orozco 2006) se obtuvo la información a utilizar, los cuales corresponden a los datos generales que presenta el suelo Bogotano. A continuación, se muestran los límites líquidos y pasticos característicos de diferentes profundidades:

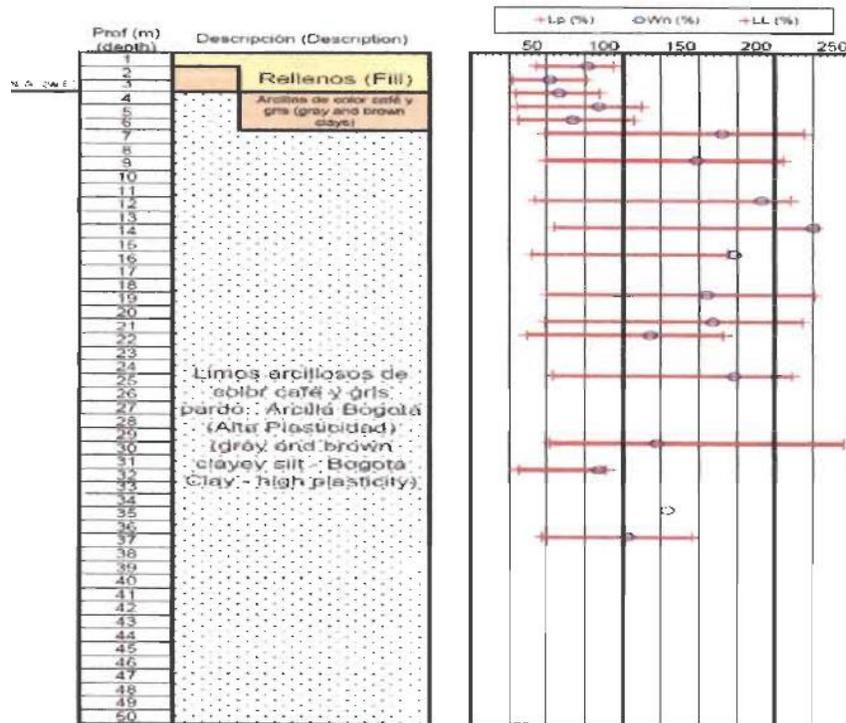


Ilustración 19: Límites de Atterberg para suelos típicos bogotanos Fuente: (Orozco 2006)

También se necesitan características del suelo que permitan determinar la cohesión. A continuación, se muestran diferentes ensayos realizados para los suelos, donde:

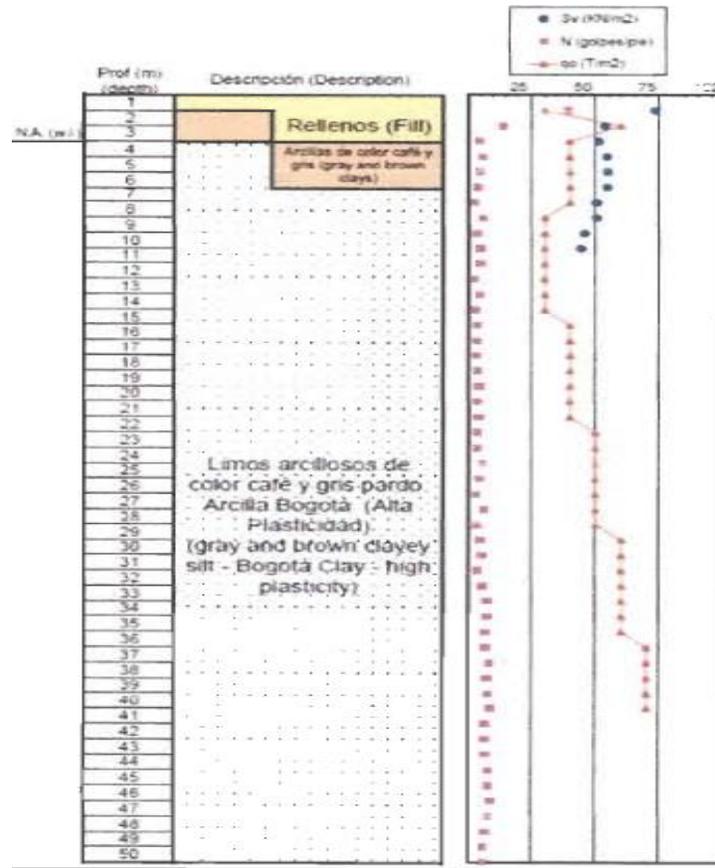


Ilustración 20: Ensayos de exploración de suelos típicos bogotanos Fuente: (Orozco 2006)

Se añaden datos correspondientes a diferentes características del suelo según su profundidad.

Tabla 5: Rango de datos para suelos bogotanos según diversas profundidades

Z (metros)	$\gamma$ (T/m <sup>3</sup> )	e	$q_u$ (T/m <sup>2</sup> )	Cc	Cr	Cs
1 a 5	1,7	-	-	-	-	-
5 a 10	1,30-1,40	4,5	0,21-0,35	2	0,44	0,31
10 a 20	1,25-1,35	5,3-3,4	0,19-0,51	2,29-1,72	0,79-0,20	0,32
20 a 30	1,38-1,54	3,4-2,1	0,40-0,50	1,72	0,20	0,27
30 a 40	1,56	2,1	0,40-0,70	1,10	0,07	0,20

Fuente: (Orozco 2006)

Se utilizan los datos brindados para así calcular la cohesión que presenta el suelo, por ello se dividen los datos por metro desde la capa 1 hasta la capa 8 y se anotan los datos de Sv (puntos azules de la ilustración 21), Lp y LL (ilustración 20).

Tabla 6: Datos iniciales de cada capa

Capa	#Capa	Z (m)	Su (KPa)	LP (%)	LL (%)
Relleno / Capa	1	1	-	-	-
Arcilla de color café-gris 1	2	2	75	45	95
Arcilla de color café-gris 2	3	3	55	25	75
Arcilla de color café-gris 3	4	4	50	30	94
Arcilla de color café-gris 4	5	5	54	35	112
Arcilla de color café-gris 5	6	6	55	35	105
Arcilla de color café-gris 6	7	7	55	50	220
Arcilla de color café-gris 7	8	8	50	50	220

Fuente: Propia.

Se utilizan las siguientes ecuaciones para determinar cuál es el valor de IP (%),  $\lambda$  y el valor de Su corregido.

$$IP(\%) = LL(\%) - LP(\%)$$

Ecuación 5: Índice de plasticidad

$$\lambda = 1,7 - 0,54 * \log[IP(\%)]$$

Ecuación 6: Índice de plasticidad

$$Su(\text{corregido}) = \lambda * Su$$

Ecuación 7: Cohesión de cada capa

Se calcula el valor de Su corregido para cada una de las capas analizadas.

Tabla 7: Cohesión de cada capa del suelo

Capa	#Capa	Z (m)	IP (%)	Lambda ( $\lambda$ )	Su Corregido (Kpa)
Capa vegetal	1	1	-	-	-
Arcilla de color café-gris 1	2	2	50	0,78	58,7
Arcilla de color café-gris 2	3	3	50	0,78	43,0
Arcilla de color café-gris 3	4	4	64	0,72	36,2
Arcilla de color café-gris 4	5	5	77	0,68	36,8
Arcilla de color café-gris 5	6	6	70	0,70	38,7
Arcilla de color café-gris 6	7	7	170	0,50	27,3
Arcilla de color café-gris 7	8	8	170	0,50	24,8

Fuente: Propia.

Se presentan los datos que se van a insertar para caracterizar a cada estrato en el programa SLIDE.

Tabla 8: Datos del suelo arcilloso a usar en SLIDE

Capa	#Capa	Z (m)	$\gamma$ (T/m <sup>3</sup> )	Resistencia al corte no drenado (Kpa)
Arcilla de color café-gris 1	1	1	1,7	58,7

Arcilla de color café-gris 2	2	2	1,7	43,0
Arcilla de color café-gris 3	3	3	1,7	36,2
Arcilla de color café-gris 4	4	4	1,4	36,8
Arcilla de color café-gris 5	5	5	1,4	38,7
Arcilla de color café-gris 6	6	6	1,4	27,3
Arcilla de color café-gris 7	7	7	1,3	24,8
Arcilla de color café-gris 8	8	8	1,3	25,9

Fuente: Propia.

De la misma forma se utiliza un material granular con el propósito de tener características que presenten Angulo de fricción para poder analizarlas en el SLIDE, para ello se utiliza una distribución por capas por lo que se proponen los siguientes estratos:

Tabla 9: Datos del suelo granular a usar en SLIDE

Material	Variable	Valor	Z (m)
Estrato 1	c' (t/m2)	1,5	1
	f' (°)	25,0	
Estrato 2	c' (t/m2)	3,0	2
	f' (°)	27,0	
Estrato 3	c' (t/m2)	3,7	3
	f' (°)	30,0	
Estrato 4	c' (t/m2)	3,3	4
	f' (°)	32,0	
Estrato 5	c' (t/m2)	10,0	5
	f' (°)	32,0	
Estrato 6	c' (t/m2)	2,5	6
	f' (°)	24,0	
Estrato 7	c' (t/m2)	15,0	7
	f' (°)	21,0	
Estrato 8	c' (t/m2)	15,0	8
	f' (°)	24,0	

Fuente: Propia.

## 8.2 Variables de análisis

Las variables establecidas para el análisis son el distanciamiento entre trinchos y la profundidad de las zanjas. Estas variables fueron seleccionadas debido a que la información encontrada para ambos casos es un estimado que queda al criterio del ingeniero, por lo que se va a analizar el

comportamiento de ambas bajo diferentes pendientes que presenten los taludes en los dos tipos de suelo.



*Ilustración 21: Variables a ser analizadas. Adaptado de: (Mateus 2014)*

## 9 Modelación del problema usando SLIDE

### 9.1 Definición de la geometría del talud y pendientes

Inicialmente se establece una geometría para los taludes modelados en SLIDE, por ello se toman las siguientes consideraciones:

- Se selecciona una profundidad entre la cota más baja del terreno y el punto más profundo del modelo de 5 metros.
- La distancia total en el eje X desde el inicio hasta el final del modelo tomado es de 15 metros.
- Se dejan distancias de 3 metros con pendiente igual a 0 en ambos costados del modelo.
- La pendiente en la cota del terreno se toma desde la coordenada (3, 5) en una longitud de 9 metros en el eje x, realizando variaciones de la altura para la pendiente.
- El nivel freático se ubica en la mitad del tercer estrato para cada uno de los suelos.

Se utiliza la herramienta de AutoCAD para ilustrar el talud de modelación a partir de las consideraciones presentadas, como se observa en la siguiente figura:

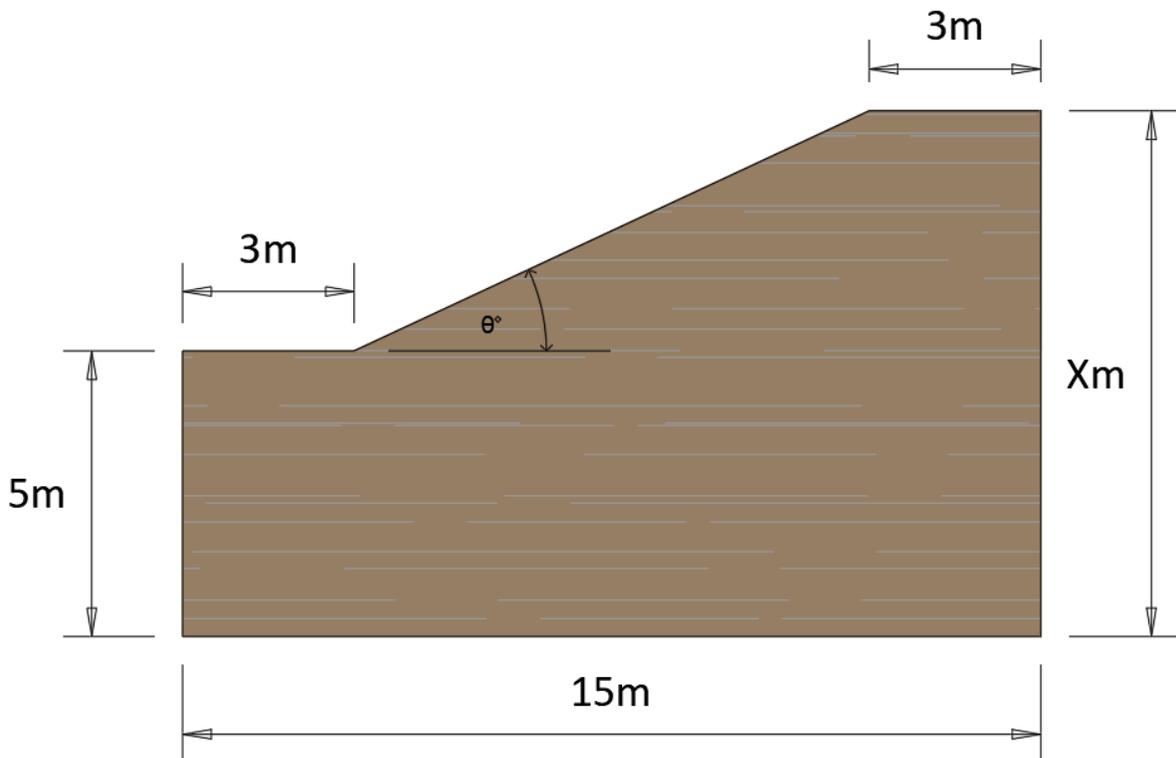


Ilustración 22: Modelo de talud según las consideraciones tomadas. Fuente: Propia.

La selección del talud donde se van a aplicar los trinchos de guadua se realiza a partir de modelos en SLIDE utilizando múltiples pendientes para analizar la variación presentada en el factor de seguridad. El objetivo de estos modelos es buscar un factor de seguridad que presente valores

levemente mayores a 1 para garantizar de que el talud pueda existir y que necesite una estabilización. Si el factor de seguridad presenta una magnitud menor a 1 significa que ese talud no puede presentarse porque las fuerzas resistentes serian menores que las fuerzas desestabilizadoras generando la falla por la envolvente indicada en el programa o en un área aún mayor si este valor es considerablemente bajo. El método utilizado para analizar el factor de seguridad del talud es el de Bishop simplificado; la razón por la que se usa un método fijo para todas las pendientes es comparar todos los valores de los factores de seguridad y así poder analizar los resultados.

Las pendientes que se utilizan para generar los primeros modelos se varían en magnitudes de 10 desde los 10 grados hasta los 70 grados, por lo que se usan la herramienta de Excel para ajustar el valor de la cota en el eje Y para los ángulos propuestos. Los datos seleccionados para las primeras modelaciones se presentan en la siguiente tabla (para las modelaciones solo se toman el valor entero redondeado al valor más bajo por lo que los ángulos presentan una reducción respecto a los estimados):

Tabla 10: Ángulos y dimensiones seleccionadas para los cálculos.

Ángulo estimado (grados)	X (m)	Y (m)	Hipotenusa (m)	Ángulo tomado (grados)
10	9	1,6	9,1	6,3
20	9	3,3	9,6	18,4
30	9	5,2	10,4	29,1
40	9	7,6	11,7	37,9
50	9	10,7	14,0	48,0
60	9	15,6	18,0	59,0
70	9	24,7	26,3	69,4

Fuente: Propia.

### 9.1.1 Modelación de pendientes para el suelo arcilloso

Se realiza la tabla de factores de seguridad para diferentes pendientes del talud usando los estratos de suelos arcillosos propuestos en la tabla 8 y los ángulos calculados en la tabla 10:

Tabla 11: Resultados de factor de seguridad por Bishop simplificado para cada ángulo de pendiente.

Talud	Ángulo (grados)	F.S.
1	6,3	15,636
2	18,4	5,563
3	29,1	3,434
4	37,9	2,459
5	48	1,819
6	59	1,354
7	69,4	1,176

Fuente: Propia.

La modelación de taludes para los estratos de suelos arcillosos muestra que la pendiente con un ángulo de 69.4° aun no llega a fallar bajo el factor de seguridad de Bishop, esto indica que la estratificación seleccionada es competente para altas pendientes.

Se realiza la gráfica que compara el ángulo del talud respecto al factor de seguridad obtenido para los estratos arcillosos a partir de los datos de la tabla 11:

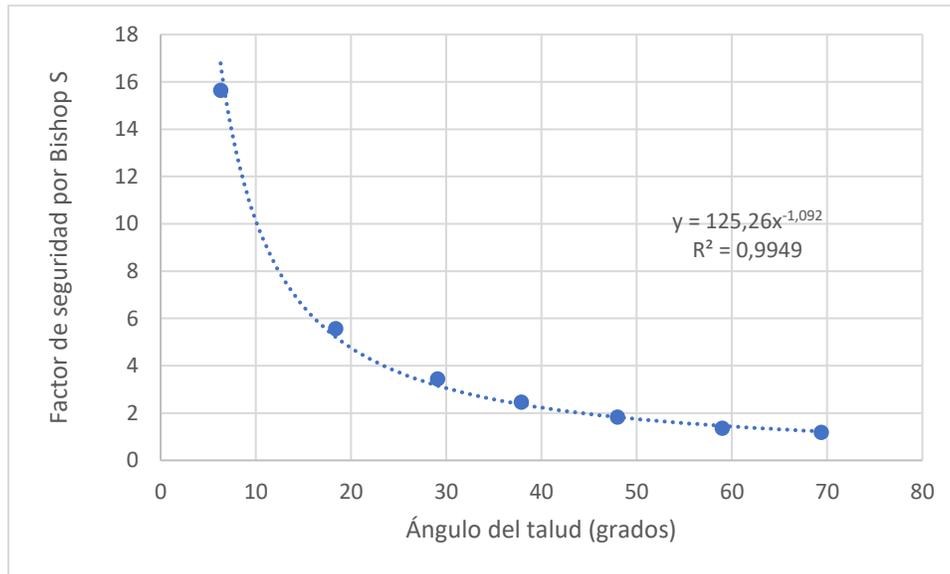


Ilustración 23 : Ángulo del talud vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo arcilloso. Fuente: Propia.

De la gráfica obtenemos una ecuación potencial que puede ayudar a describir el comportamiento aproximado de un talud de diferentes pendientes que tenga una composición de suelo similar a la presentada en los estratos arcillosos seleccionados. Se puede observar que el valor de  $R^2$  presentado es muy cercano a 1, esto genera que los resultados calculados con la ecuación tengan un valor muy cercano al que se puede presentar variando la pendiente en el rango establecido entre 6.3 y 69.4 grados. Se presenta la ecuación para suelos arcillosos:

$$F.S. (Bishop) = 125.26 * \text{ángulo del talud (grados)}^{-1.092}$$

Ecuación 8: F.S. para ángulos de taludes en suelos arcillosos.

La ecuación presentada nos ayuda a estimar el punto crítico donde el ángulo del talud generará que la pendiente presente el factor de seguridad igual a 1 como se presenta a continuación (para este caso el valor no es tan fiable, ya que no se encuentra en el rango de valores tomados):

$$1 = 125.26 * \text{ángulo del talud (grados)}^{-1.092}$$

$$\text{ángulo del talud (grados)} = 83.34^\circ$$

la ecuación muestra que el punto crítico se presenta con un ángulo de 83.34°, por lo que para las próximas modelaciones y análisis utilizando estabilización con trinchos de guadua se opta por seleccionar el modelo que presenta la pendiente de 69.4° y un F.S. de 1.176.

Se presenta el modelo seleccionado:

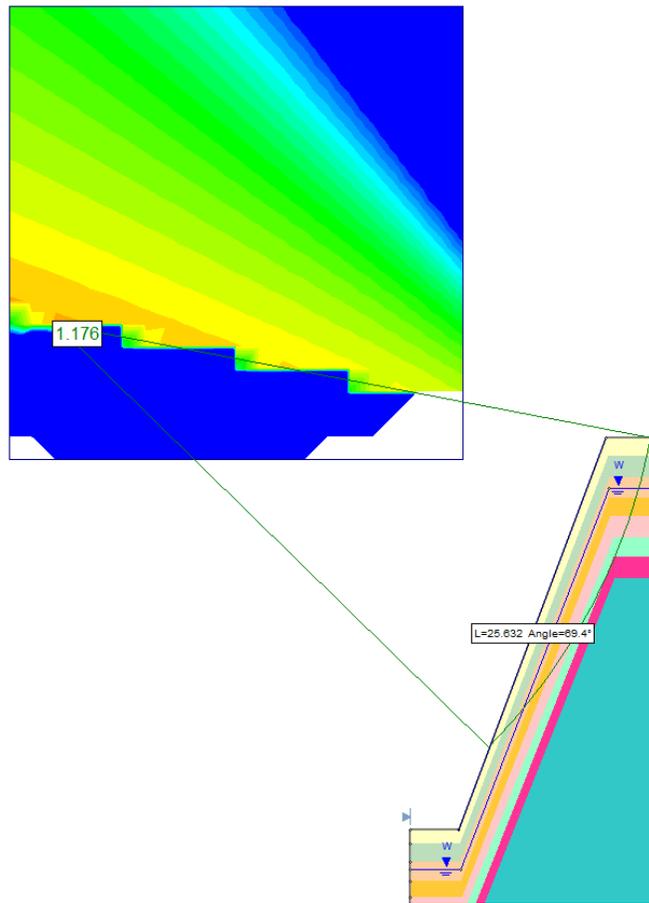


Ilustración 24: Modelo seleccionado para suelos arcillosos. Fuente: Propia.

### 9.1.2 Modelación de pendientes para el suelo granular

Se realiza la tabla de factores de seguridad para diferentes pendientes del talud usando los estratos de suelo granulares propuestos en la tabla 9 y los ángulos calculados en la tabla 10:

Tabla 12: Resultados de factor de seguridad por Bishop simplificado para cada ángulo de pendiente.

Talud	Ángulo (grados)	F.S.
1	6,3	6,016
2	18,4	1,996
3	29,1	1,199
4	37,9	0,906
5	48	0,692
6	59	0,379
7	69,4	0,097

Fuente: Propia.

La modelación para los estratos de suelos arcillosos muestra que hasta la pendiente con un ángulo de 37.9° falla bajo el factor de seguridad de Bishop, esto indica que la estratificación seleccionada presenta su falla entre las pendientes modeladas y por consiguiente el estrato no funciona para altas pendientes.

En la siguiente grafica se compara el ángulo del talud respecto al factor de seguridad obtenido para los estratos granulares a partir de los datos de la tabla 12:

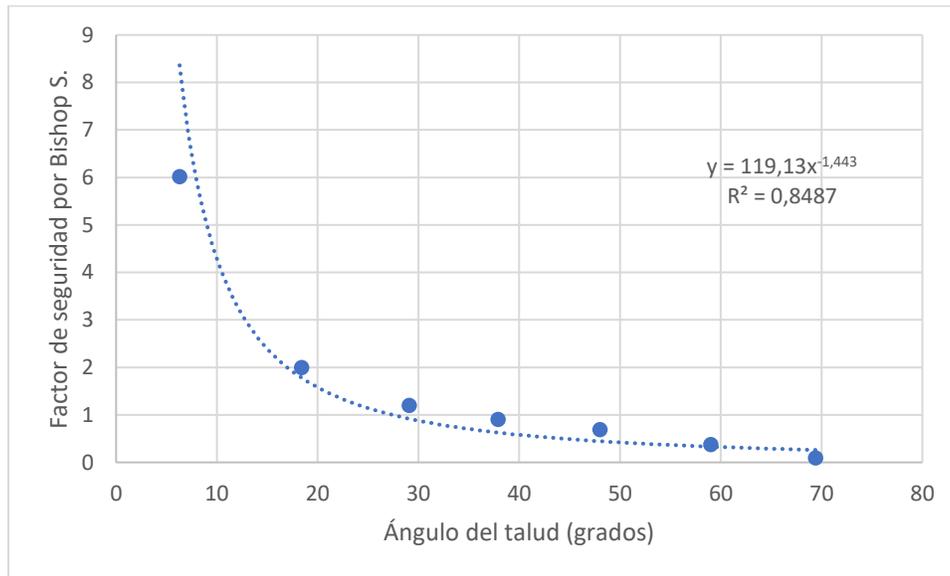


Ilustración 25: Ángulo del talud vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo arcilloso. Fuente: Propia.

La ecuación presenta un valor de  $R^2=0.8487$  lo que significa que los valores que se calculen no presentaran una buena aproximación como si pasa en los estratos arcillosos, ya que la curva generada no se apega a los datos de forma adecuada. Si  $R^2$  presentara un valor cercano a 1, este se podría tener en cuenta para hallar escenarios que presenten pendientes en el rango tomado para escenarios con condiciones similares, sin embargo, para este caso el dato puede dar un factor de seguridad cercano al modelado para distintas pendientes "x". Se presenta la ecuación para suelos granulares:

$$F.S. (Bishop) = 119.13 * \text{ángulo del talud (grados)}^{-1.443}$$

Ecuación 9: F.S. para ángulos de taludes en suelos granulares.

La ecuación presentada nos ayuda a estimar el punto crítico donde el ángulo del talud generará que la pendiente presente el factor de seguridad igual a 1 como se presenta a continuación:

$$1 = 119.13 * \text{ángulo del talud (grados)}^{-1.443}$$

$$\text{ángulo del talud (grados)} = 27.47^\circ$$

la ecuación muestra que el punto crítico se presenta con un ángulo de 27.47°, por lo que para las próximas modelaciones y análisis utilizando estabilización con trinchos de guadua se opta por seleccionar el modelo que presenta la pendiente de 29.1° y un F.S. de 1.199; se selecciona debido a

que es el talud modelado que presenta un valor más cercano al punto crítico sin llegar a la falla y además que tiene un factor de seguridad semejante al seleccionado en el suelo arcilloso.

En la siguiente figura se presenta el modelo seleccionado:

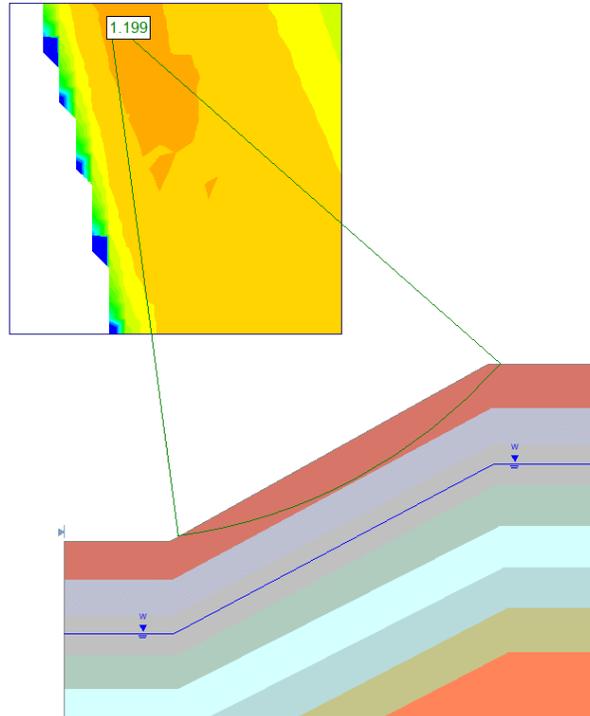


Ilustración 26: Modelo seleccionado para suelos granulares. Fuente: Propia.

## 9.2 Modelaciones de trinchos de guadua para los suelos seleccionados

Teniendo en cuenta los modelos seleccionados para los suelos arcillosos y granulares (véase figuras 24 y 26), se selecciona una forma de analizar las variables presentadas, para ello se toman las siguientes consideraciones:

- Se establece que no se implementa altura para el trincho, debido a que no tiene aplicabilidad en SLIDE.
- Se mantendrá la profundidad del trincho desde la cota del terreno en 1.4m.
- Se realiza una variación de la distancia en un rango de 0.3m a 1.5m, aumentando la distancia en 0.3m para cada modelo.
- El sistema utilizado en SLIDE para simular el comportamiento de la guadua será un sistema de micropilotes hincados en un metro de ancho
- El diámetro externo de la guadua se establece como 15cm con un espesor de guadua de 1cm.
- Según (Camargo García and Suarez Franco 2014) la resistencia cortante de la guadua angustifolia varía en un rango entre 4.7MPa y 7.53MPa. El valor utilizado para el modelo se

toma como 7MPa, a partir de los valores especificados por Camargo y Arbeláez dados en la siguiente tabla:

Tabla 13: resistencias al corte y compresión de la guadua angustifolia.

Property	Bamboo species	Mean	Reference
Shear strength (Mpa)	<i>Guadua angustifolia</i>	3.08 (±0.67)	In this study
	<i>Gigantochloa scortechinii</i> <sup>2</sup>	4.52	Mohmod <i>et al.</i> (1990)
	<i>Bambusa vulgaris</i> <sup>2</sup>	4.53	Mohmod <i>et al.</i> (1990)
	<i>Bambusa blumeana</i> <sup>2</sup>	4.81	Mohmod <i>et al.</i> (1990)
	<i>Guadua angustifolia</i>	7.53	Camargo (2006)
	<i>Guadua angustifolia</i>	4.7-5.1	Takeuchi (2005)
	<i>Guadua angustifolia</i> <sup>3</sup>	7.3	Correal & Arbelaez (2010)
Compression strength (Mpa)	<i>Guadua angustifolia</i>	41.6 (±9.9)	In this study
	<i>Guadua angustifolia</i>	30.1	Gonzalez <i>et al.</i> (2008)
	<i>Bambusa blumeana</i> <sup>2</sup>	27.08	Mohmod <i>et al.</i> (1990)
	<i>Bambusa vulgaris</i> <sup>2</sup>	28.17	Mohmod <i>et al.</i> (1990)
	<i>Gigantochloa scortechinii</i> <sup>2</sup>	28.79	Mohmod <i>et al.</i> (1990)
	<i>Guadua angustifolia</i>	30.7	Camargo (2006)
	<i>Guadua angustifolia</i> <sup>3</sup>	35.2	Correal & Arbelaez (2010)
	<i>Phyllostachys pubescens</i> <sup>1</sup>	86.5	Li (2004)

Fuente: (Camargo García and Suarez Franco 2014).

Se realiza el cálculo de la resistencia al cortante para el modelo a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia al corte (KN)} = \text{Área de guadua en profundidad del talud(m)} * \text{resistencia al corte (KPa)}$$

Ecuación 10: Resistencia al corte usada en el modelo.

$$\text{Resistencia al corte (KN)} = \frac{n * Dext (m)^2 - Dint (m)^2 * \pi}{4} * \text{resistencia al corte (KPa)}$$

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos al reemplazar los valores usados en las ecuaciones:

Tabla 14: Resistencia al corte usado para el modelo.

<b>Diámetro exterior - Dext</b>	0,15 m
<b>Diámetro interior - Dint</b>	0,14 m
<b>Número de secciones de guadua</b>	7
<b>Área de guadua en 1 metro</b>	0,015944 m <sup>2</sup>
<b>Resistencia al corte de la guadua</b>	7000 kPa
<b>Resistencia al corte de la guadua</b>	111,61 kN
<b>Resistencia al corte de la guadua</b>	11376,66 kgf

Fuente: Propia.

Los taludes presentan la misma geometría en su eje x, por lo que para cada espaciamiento de los modelos se tendrá la misma cantidad de trinchos (pilotes). En la siguiente tabla se muestra el número de trinchos para cada espaciamiento presentado:

Tabla 15: cantidad de trinchos en los modelos para cada espaciamiento.

Espaciamiento $e$ (m)	# pilotes de refuerzo en el talud
0,3	33
0,6	16
0,9	11
1,2	9
1,5	7

Fuente: Propia.

Con los parámetros especificados se realiza la modelación para ambos tipos de suelo.

### 9.2.1 Análisis de trinchos para suelos arcillosos

Se realiza el modelamiento de trinchos para el suelo arcilloso, teniendo en cuenta las características iniciales del material y las asignadas anteriormente para los trinchos de guadua. Los resultados obtenidos según el espaciamiento asignado entre trinchos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 16: F.S. para variación de trinchos a la profundidad de 1.4m para el suelo arcilloso.

Condición	Espaciamiento $e$ (m)	F.S.
Sin refuerzo	-	1,176
Con refuerzo	0,3	1,785
	0,6	1,327
	0,9	1,325
	1,2	1,278
	1,5	1,176

Fuente: Propia.

Se puede apreciar que en la tabla 16 hay dos escenarios de interés; en el primero se observa que con un espaciamiento de 0.3m hay un aumento importante del F.S. respecto a los otros resultados mientras que en el segundo caso se puede apreciar que entre 0.6m y 0.9m la variación es prácticamente imperceptible. Las posibles razones de estos comportamientos se pueden deber a que los trinchos que están interactuando con la envolvente de falla son muchos más en 0.3m que en el resto de los modelos realizados para el primer caso, mientras que en el segundo pasa lo opuesto porque hay un aumento en el espaciamiento, sin embargo la cantidad de trinchos que influyen directamente en la envolvente de falla es la misma para ambos casos (modelos en ANEXOS).

En la siguiente figura se grafica la variación del comportamiento del factor de seguridad respecto al espaciamiento entre los trinchos hincados a una profundidad de 1.4m para los estratos arcillosos a partir de los datos de la tabla 16:

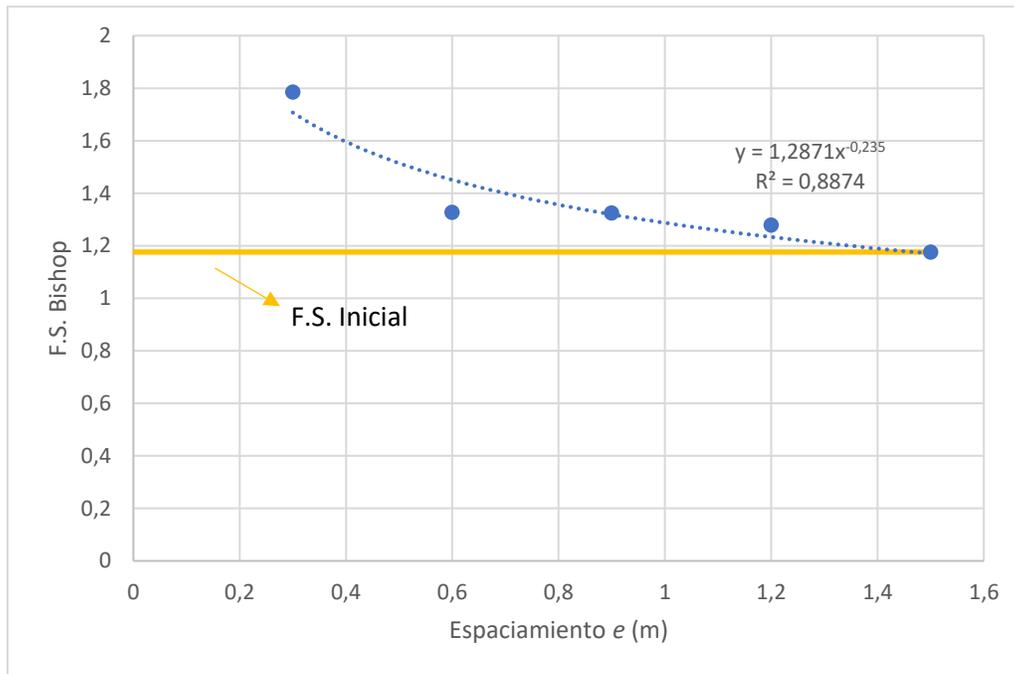


Ilustración 27: Espaciamiento (m) vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo arcilloso. Fuente: Propia.

En la gráfica se puede observar que los valores se acercan al F.S. inicial a medida que se aumenta el espaciamiento entre los trinchos, además la resistencia con  $S=0.3m$  resulta ser mucho mayor a los otros resultados que parecen tener un comportamiento lineal. A continuación, se muestra la ecuación que modela la gráfica obtenida:

$$F.S. (Bishop) = 1.2871 * \text{Espaciamiento (m)}^{-0.235}$$

Ecuación 11: F.S. en talud reforzado según espaciamiento para suelo arcilloso.

La ecuación obtenida para la profundidad de 1.4m no aproxima exactamente los valores debido a que su valor de  $R^2$  se aleja de la unidad y esto hace que la interpolación realizada entre los rangos analizados genere valores lejanos a los obtenidos modelando en SLIDE como se puede apreciar en la gráfica de la figura 27 en los espaciamientos de 0.3m, 0.6m y 1.2m. La ecuación puede ser usada para dar una estimación del F.S. que se presente con algún espaciamiento del rango, pero no se debe tomar este valor como absoluto.

En la siguiente tabla se calcula la diferencia porcentual respecto al F.S. que presenta el talud sin refuerzo, así como también el incremento porcentual del F.S. entre espaciamientos.

Tabla 17: Calculos porcentuales para suelo arcilloso

Espaciamiento e (m)	Aumento de F.S. respecto a F.S. inicial (%)	Δ Aumento de F.S. (%)
1,5	0,00%	0,00%
1,2	8,67%	8,67%

0,9	12,67%	4,00%
0,6	12,84%	0,17%
0,3	51,79%	38,95%

Fuente: Propia.

Los resultados de la tabla 17 reflejan que al reforzar un talud con las características presentadas se aconseja reforzar con espaciamentos cercanos a 1.2m si se requiere aumentar ligeramente las fuerzas resistentes del talud, mientras que si se necesita una intervención que aumente las fuerzas resistentes del talud es mejor realizar espaciamentos cercanos a 0.3m con profundidades de trinchos de 1.4m a nivel teórico. Los trinchos con pendientes tan elevadas no son aconsejables debido a la complejidad que estos presentan en su construcción, ya que al aplicar espaciamentos de 0.3m se puede afectar la resistencia del talud antes de completar la intervención, por lo que se aconseja la aplicación a 1.2m de espaciamento, pero si se requiere un aumento mayor de F.S. se aconseja buscar otros métodos de reforzamiento de taludes.

## 9.2.2 Análisis de trinchos para suelos granulares

### 9.2.2.1 Análisis inicial Z=1,4m

Se realiza el modelamiento de trinchos para el estrato granular, teniendo en cuenta las características iniciales del material y las asignadas anteriormente para los trinchos de guadua. Los resultados obtenidos según el espaciamento asignado entre trinchos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 18: F.S. para variación de trinchos a la profundidad de 1.4m para el suelo granular.

H = 1,4m		
Condición	Espaciamento e (m)	F.S.
Sin refuerzo	-	1,199
Con refuerzo	0,3	1,968
	0,6	1,968
	0,9	1,968
	1,2	1,968
	1,5	1,92

Fuente: Propia.

Se puede apreciar que para este caso no hay una variación de F.S., ya que esta únicamente varía con un espaciamento de 1.5m ya que en este caso es el único en que no se genera la misma envolvente, cambiando así el factor de seguridad mínimo que presenta el talud (modelos en ANEXOS). La aplicación de trinchos aumenta el F.S. hasta un valor donde se considera estabilizado, por lo que se aconseja para este talud aplicar trinchos de 1.4m a 1.2m de espaciamento.

En la siguiente grafica se ilustra la variación del comportamiento del factor de seguridad respecto al espaciamento entre los trinchos hincados a una profundidad de 1.4m para los estratos granulares a partir de los datos de la tabla 18:

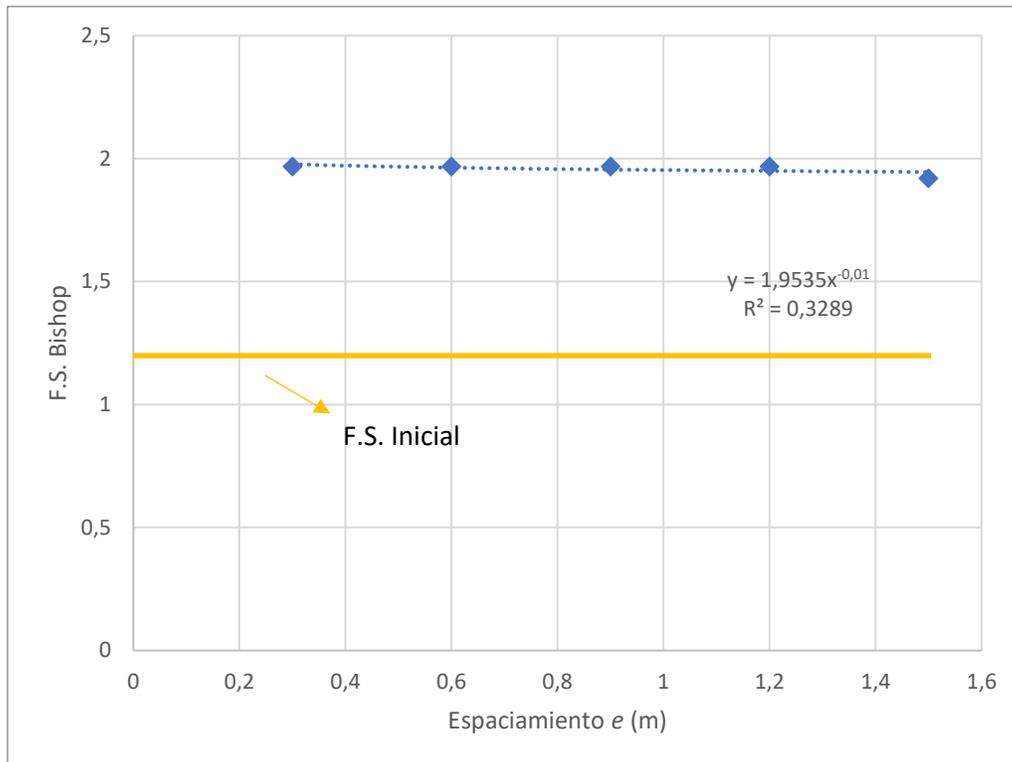


Ilustración 28: Espaciamento (m) vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo granular H=1.4m. Fuente: Propia.

En la gráfica se puede observar que los valores no sufren cambio en el F.S. con excepción de un dato. A continuación, se muestra la ecuación que modela la gráfica obtenida:

$$F.S. (Bishop) = 1.9535 * \text{Espaciamento (m)}^{-0.01}$$

Ecuación 12: F.S. en talud reforzado según espaciamento para suelo granular con H=1.4m.

La ecuación obtenida para la profundidad de 1.4m resulta no es funcional para representar una interpolación de los datos debido a que su valor de  $R^2$  se aleja mucho de la unidad por lo que no se aconseja hacer uso de ella más que para estimar valores de F.S. en el rango de espaciamento entre 1.2m y 1.5m, pero si se quiere un resultado con los cálculos se aconseja tomar en ese rango el menor valor (F.S.=1.92).

Los resultados mostrados para el modelo granular indican que la profundidad de los trinchos son un factor prioritario, ya que en el modelo realizado estos demuestran tener una importancia mucho mayor que en el caso del estrato arcilloso, por lo que se procede a realizar el mismo análisis de espaciamento a profundidades de 0.9m y 1.9m para ver si esta tendencia continua y analizar la variación de F.S. que se presenta.

### 9.2.2.2 Análisis con Z=1,9m

Se realiza el modelamiento de trinchos para el suelo granular, teniendo en cuenta las características iniciales del material y las asignadas anteriormente para los trinchos de guadua a una profundidad de 1.9m. Los resultados obtenidos según el espaciamiento asignado entre trinchos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 19: F.S. para variación de trinchos a la profundidad de 1.9m para el suelo granular.

H = 1,9m		
Condición	Espaciamiento e (m)	F.S.
Sin refuerzo	-	1,199
Con refuerzo	0,3	4,282
	0,6	4,274
	0,9	4,237
	1,2	4,219
	1,5	4,219

Fuente: Propia.

Se observa que hay una gran variación respecto a los valores de F.S. para Z=1.4 (véase tabla 18), ya que a esta profundidad se obtiene un talud completamente para todos los casos sin sufrir mayor variación en el F.S. presentado.

En la siguiente grafica se ilustra la variación del comportamiento del factor de seguridad respecto al espaciamiento entre los trinchos hincados a una profundidad de 1.9m para los estratos granulares a partir de los datos de la tabla 19:

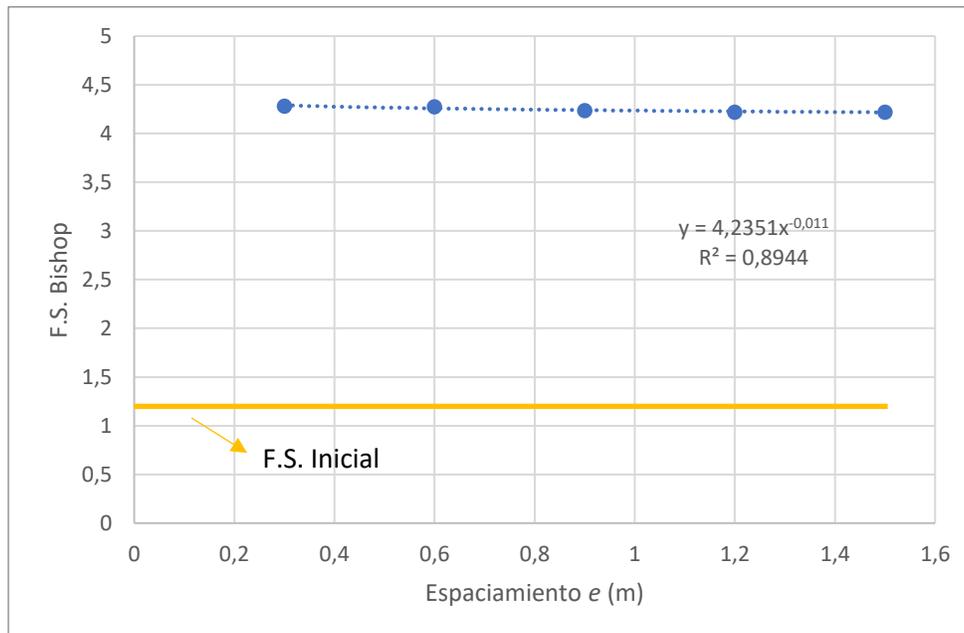


Ilustración 29: Espaciamiento (m) vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo granular H=1.9m. Fuente: Propia.

En la gráfica se puede observar que no hay una variación significativa de F.S. entre los espaciamientos y que todos los valores brindados por el modelo se encuentran muy por encima del F.S. del talud sin presentar un refuerzo. A continuación, se muestra la ecuación que modela la gráfica obtenida:

$$F.S. (Bishop) = 4.2351 * \text{Espaciamiento (m)}^{-0.011}$$

*Ecuación 13: F.S. en talud reforzado según espaciamento para suelo granular con H=1.9m.*

La ecuación obtenida para la profundidad de 1.9m resulta ser buena debido a que su valor de  $R^2$  se acerca a la unidad y esto hace que la interpolación realizada entre los rangos analizados genere valores muy semejantes a los obtenidos modelando en SLIDE taludes con características similares a las usadas. El uso de esta ecuación puede ser realizado ya que aproxima acertadamente los valores, sin embargo, como la variación de F.S. es tan baja que los valores calculados no presentarían una variación significativa.

Los resultados de la tabla 19 y la ilustración 29 indican que la mejor solución para este tipo de taludes es con un espaciamento de 1.5m, ya que las mejoras de resistencia al disminuir el espaciamento no son significativas en aumento de F.S. pero si aumentan los costos constructivos considerablemente

### 9.2.2.3 Análisis con Z=0.9m

Se realiza el modelamiento de trinchos para el suelo granular para una profundidad de 0.9m, teniendo en cuenta las características iniciales del material y las asignadas anteriormente para los trinchos de guadua. Los resultados obtenidos según el espaciamento asignado entre trinchos se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 20: F.S. para variación de trinchos a la profundidad de 0.9m para el suelo granular.*

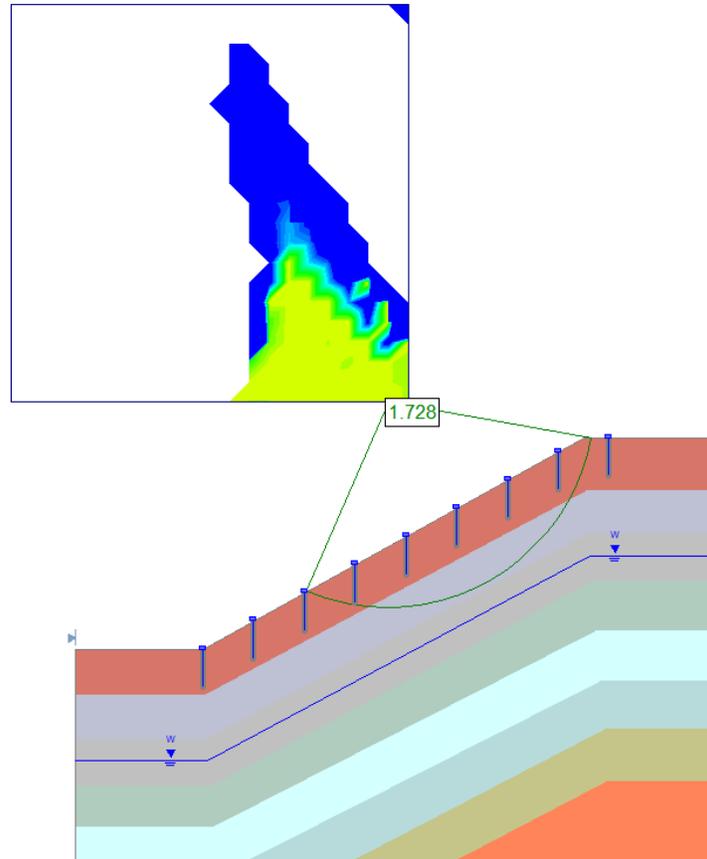
H = 0,9m		
Talud	Espaciamento e (m)	F.S.
Sin refuerzo	-	1,199
Con refuerzo	0,3	1,783
	0,6	1,783
	0,9	1,728
	1,2	1,783
	1,5	1,491

*Fuente: Propia.*

Los resultados de la tabla 20 muestran que el valor de F.S. tiene un comportamiento similar que el presentado con una profundidad de 1.4m (véase tabla 18), sin embargo, presenta 3 variaciones las cuales son (modelos en ANEXOS):

- La magnitud de los valores presentados desciende en mayor medida que en el modelo para H= 1.4m.

- Se presenta una variación en el espaciamiento de 0.9m, ya que la organización de los taludes con una profundidad inferior genera que se presente una envolvente en la mitad del talud, que en el caso de H=1.4m no se presenta porque uno de los trinchos logra pasar por esa envolvente. En la siguiente figura se muestra el modelo del caso presentado:



*Ilustración 30: Envolvente de falla para 0.9m y Z=0.9m*

- Hay un descenso mucho más notorio en la resistencia a 1.5m de espaciamiento.

En la siguiente grafica se ilustra la variación del comportamiento del factor de seguridad respecto al espaciamiento entre los trinchos hincados a una profundidad de 0.9m para los estratos granulares a partir de los datos de la tabla 20:

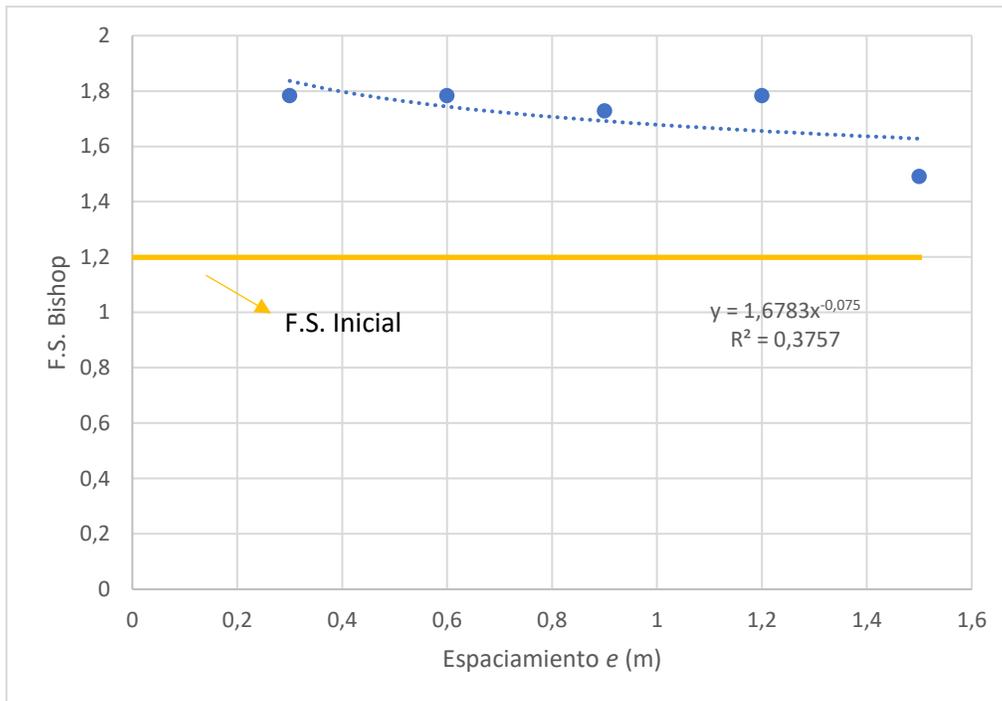


Ilustración 31: Espaciamiento (m) vs factor de seguridad por Bishop simplificado en suelo granular H=0.9m. Fuente: Propia.

La gráfica comprueba que el comportamiento de F.S. es similar a los presentados a H= 1.4m (ver tabla 18) y que los valores de F.S. para profundidades comprendidas entre 0.9 y 1.4 metros no presentarán variaciones significativas.

En la gráfica se puede observar que los valores se acercan al F.S. del talud sin reforzar a medida que se aumenta el espaciamiento entre los trinchos. A continuación, se muestra la ecuación que modela la gráfica obtenida:

$$F.S. (Bishop) = 1.6783 * \text{Espaciamiento (m)}^{-0.075}$$

Ecuación 14: F.S. en talud reforzado según espaciamiento para suelo granular con H=0.9m.

La ecuación obtenida para la profundidad de 0.9m al igual que la presentada para un H= 1.4m (véase ecuación 13) no aproximan de forma adecuada los resultados de los modelos, pero pueden dar una idea de los resultados, que para H= 0.9m se obtienen datos ligeramente más confiables, ya el valor de  $R^2$  es mayor por las características particulares del modelo.

#### 9.2.2.4 Análisis de conjunto de datos

Los resultados para los 3 modelos muestran que para profundidades de 0.9m y 1.4m hay un comportamiento similar (véanse tablas 18 y 20) mientras que para H=1.9m hay un importante incremento en los valores de F.S. que no varía para ninguno de los espaciamientos (véase tabla 19).

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los datos obtenidos de los modelos de 0.9m, 1.4m y 1.9m.

Tabla 21: Resumen de F.S. presentados en los modelos

Espaciamiento <i>e</i> (m)	F.S. (Bishop S.)		
	H = 0,9m	H = 1,4m	H = 1,9m
1,5	1,491	1,92	4,219
1,2	1,783	1,968	4,219
0,9	1,728	1,968	4,237
0,6	1,783	1,968	4,274
0,3	1,783	1,968	4,282

Fuente: Propia.

En la siguiente tabla se realizan cálculos de la variación de F.S. en los modelos, por lo que se halla la diferencia porcentual respecto al F.S. inicial, así como también el  $\Delta$  F.S. que se presenta variando el espaciamiento. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 22: Análisis de datos para modelos granulares.

Espaciamiento <i>e</i> (m)	Aumento de F.S. según refuerzo (%)			$\Delta$ F.S. (%)		
	H = 0,9m	H = 1,4m	H = 1,9m	H = 0,9m	H = 1,4m	H = 1,9m
1,5	24,35%	60,13%	251,88%	24,35%	60,13%	251,88%
1,2	48,71%	64,14%	251,88%	24,35%	4,00%	0,00%
0,9	44,12%	64,14%	253,38%	-4,59%	0,00%	1,50%
0,6	48,71%	64,14%	256,46%	4,59%	0,00%	3,09%
0,3	48,71%	64,14%	257,13%	0,00%	0,00%	0,67%

Fuente: Propia.

De los cálculos realizados para los modelos granulares se obtienen los siguientes análisis:

- Los resultados muestran que el incremento importante de F.S. se presenta para la separación mayor de 1.5m que es la mayor analizada, lo que refleja la gran influencia para F.S. que tiene el reforzamiento de taludes con trinchos de guadua (véase tabla 22).
- En los datos de H= 0.9m se observa que al reducir la separación de 1.5m a 1.2m se duplica el F.S. presentado y a una separación de 0.9m vuelve a descender por lo que la separación óptima para esta profundidad de trincho se encuentra en valores cercanos a 1.2m (véanse tablas 21 y 22).
- En los datos correspondientes a un H= 1.4m se muestra que en el rango de espaciamientos analizados la separación optima se encuentra a 1.2m aunque por cuestiones de costos es mejor a 1.5m, ya que la diferencia de resistencia no significativa (véanse tablas 21 y 22).
- Cuando se presenta un H=1.9m se tiene un incremento del 200% en el F.S. respecto a los dados con un H=1.4m por lo que es notorio que entre las profundidades presentadas esta es la mejor opción, pero no se puede determinar si esta es la profundidad optima, ya que no se sabe si entre este rango de valores se presenta un cambio significativo en el F.S. a una profundidad específica o si este cambio es lineal (véanse tablas 21 y 22).
- El F.S. de los trinchos con un Z=1.9m pueden ser menores a los mostrados por el modelo debido a que la longitud de las secciones de guadua puede hacer que estas se pandeen, ya

que el aumento de longitud de las secciones genera que las mismas tengan una menor rigidez.

- En los modelos presentados (véase ANEXOS) se observa que el trincho de mayor influencia es el primero que se encuentra en el talud, por lo que se aconseja aumentar la profundidad de este para pendientes similares a las del modelo granular, ya que se previene en gran medida todas las envolventes comunes de fallas circulares que se pueden presentar

## 10 Conclusiones y recomendaciones

- La guadua presenta unas características de resistencia mecánica que la hacen ser un gran material para el reforzamiento de taludes con el uso de trinchos (pilotes).
- Según los modelos analizados, se aconseja el uso de los trinchos de guadua para taludes con estratos arcillosos de altas pendientes con un espaciamiento de 1.2m.
- Según los modelos analizados, se aconseja que el uso de los trinchos de guadua para taludes granulares de pendientes similares a los modelos analizados cuenten con un espaciamiento de 1.5m y profundidades de trinchos de 1.9m, sin embargo, se deben realizar pruebas de pandeamiento y corte del material para analizar cuál es la sección de guadua que genera una mejor relación rigidez-longitud.
- Para la mayoría de los modelos numéricos analizados en el suelo granular con pilotes como técnica de refuerzo se obtuvo una superficie de falla crítica que se desplaza bajo estos. En algunos casos, para profundidades de 1.9m, la superficie de falla incluye algunos de los pilotes.
- Dado que la superficie de falla se desplaza bajo los pilotes en todo el talud, no se encontró gran variación de F.S. con la variación del espaciamiento de los trinchos para el modelo granular.
- Se aconseja colocar el primer muro que se ubica en el inicio del pie del talud a una profundidad mayor que el resto con el objetivo de incrementar el F.S. para todas las potenciales envolventes de falla que atraviesen todo el talud. Esto se debe a que en los modelos granulares de profundidad de pilotes de 0.9m y 1.4m, el punto de falla crítica se encuentra por debajo del primer pilote colocado y se extiende por la pendiente el hasta el punto superior del talud.
- La modelación numérica en el programa SLIDE se realizó por medio de la opción “micropilotes” para simular la guadua teniendo únicamente en cuenta la resistencia a cortante. Este programa no permite insertar muros por lo tanto para simular este tipo de configuración se requiere un programa en tres dimensiones.
- El programa SLIDE no permite modelar adecuadamente la geometría de la guadua, en este trabajo su modelación fue por medio de micropilotes y por lo tanto no se pueden tener en cuenta las zonas de juntas que presenta la guadua. Se recomienda el uso de programas que permitan variar la geometría para simular correctamente el material.
- Para estudiar la respuesta esfuerzo y deformación del suelo con guadua se recomienda realizar modelos numéricos en software de elementos finitos como Plaxis o Phase-Roscience en dos o tres dimensiones.

## 11 Bibliografía

- Añazco, Mario. 2014. "Estudio de Vulnerabilidad Del Bambú (*Guadua Angustifolia*) Al Cambio Climático En La Costa Del Ecuador y Norte Del Perú." *Unión Europea - Red Internacional Del Bambú y Ratán* 134.
- Camargo García, Juan Carlos, and Juan David Suarez Franco Suarez Franco. 2014. "Compression Resistance and Shear Strength of *Guadua*." 17:117–24.
- Carmioli Umaña, Virginia. 2009. "Bambú *Guadua*, En Muros de Contención." *Tecnología En Marcha* 22(4):44.
- Downs, Miriam. 2013. "Manual De Bioingeniera." *Cruz Roja Hondureña, Cruz Roja Suiza*.
- Downs, Miriam, and Linda Zilbert. 2010. "Manual de Bioingeniería Reduciendo Riesgos y Adaptandonos Al Cambio Climático." 82.
- Hernández Bonilla, Wilmar Alonso. 2018. "Recuperación de Taludes a Través de Obras de Bioingeniería, Sobre La Metodología Basada En El Material de *Guadua* Caso de Estudio: Zona Andina – Paramo de Sumapaz."
- Juarez Diaz, Jaime. 1998. *Deslizamientos y Estabilidad Taludes En Zonas Tropicales*.
- Mateus, Walter Prieto. 2014. "Propuesta Metodológica Para La Implementación de Trinchos de *Guadua* Como Medida Bioingenieril Para Un Tramo de La Vía Chía-Zipaquirá."
- Morales Herrera, Laura Alejandra, and Cristian Giraldo Sarmiento Restrepo. 2020. "Control de Erosión y Meteorización Con *Guadua* En Taludes Del Municipio de San Francisco Cundinamarca, Vereda Tóriba."
- Vojtasik, Karel, Milan Chodacki, and Tomas Hochsmann. 2014. "Ground Improvement by a Nonparallel Layout of Soil Nails." *Advanced Materials Research* 1020(February):447–50. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1020.447.
- Bache, D.H. and MacAskill, I.A. 1984. "Vegetation in civil and landscape engineering" Granada Technical books, London, 317 p.
- Burroughs, E.P. and Thomas, R.R. 1976. "Root Strength of Douglas Fir as a Factor in Slope Stability", USDA Forest Service Review, Draft, INT 1600-12 (9/66).
- Fernández, Ampuero. 2015. "La vegetación en los taludes" *Obras Urbanas* 54.
- Gray, D. H. and Ohashi, H. 1983. "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 109, No. 3, pp. 335-353, New York.
- Gray, D.H. 1974. "Reinforcement and Stabilisation of Soil by Vegetation", *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, GT6 pp. 695-699, New York.
- Gray, D.H. 1978. "Role of Woody Vegetation in Reinforcing Soils and Stabilizing Slopes", *Symposium on Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques*, Sydney, Australia, pp. 253-306.
- Green line Gardens. 2018. "Conociendo más a los árboles: raíces y trasplantes".
- Greenway, D.R. 1987. "Vegetation and Slope Stability", *Slope Stability*, edited by Anderson M.G,

- John Wiley and Sons Ltd. Pp. 187-230, New York.
- Hernández, S. and Jiménez, M "Agrotecnología"
- Janbú, N. 1973, "Slope Stability Computations", Embankment Dam Engineering, Edited By Hirschfeld R.C. - Poulos S.J., John Wiley and Sons, pp. 47-86, New York.
- Morales, Rafael. 2017. "Interceptación y captación de agua por la vegetación".
- Orozco, Luiz. 2006. "Arcillas de Bogotá".
- Rice, R.M. and Krames, J.S. 1970. "Mass-Wasting Process in Watershed Management," Proceedings on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management, ASCE, pp. 231-260.
- Rodriguez, A. and Castillo, H 2006. "Ingenieria de suelos en vias terrestres-carreteras, ferrocarriles y aeropistas".
- Schiechl, H.M. 1980. "Bioengineering for land Reclamation and Conservation" University of Alberta Press, 404 p. Edmonton Alberta Canadá.
- Styczen, M.E. and Moran, R.P.C. 1996. "Engineering properties of vegetation" Slope Stabilization and Erosion Control.
- Turmanina, V.I., 1965. "The Strength of Tree Roots", Bulletin of the Moscow Society of Naturalists, Biological Section, Vol. 70, pp. 36-45.
- Turner, A.K. 1996. "Colluvium and talus". Landslides investigation and mitigation. Special report 247. Transportation research Board. Pp. 525-554.
- Watson, A.J. and O`Loughlin C.L. 1990. "Structural root morphology and biomass of three age classes of Pinus radiata". New Zealand Journal of forestry science 20 (1):97-110.
- Yagi, N.- Yatabe R. and Enoki M.- Hassandi A. 1994. "The effects of Root Networks on Slope Stability", International Conference on Landslides and Slope Stability, pp. 387-392, Kuala Lumpur, Malaysia.

## 12 ANEXO

En las siguientes figuras se muestran los modelos obtenidos para las pendientes analizadas donde se utilizaron los estratos de la tabla 8 pertenecientes a suelos arcillosos. Los resultados de los modelos se pueden observar en la tabla 11.

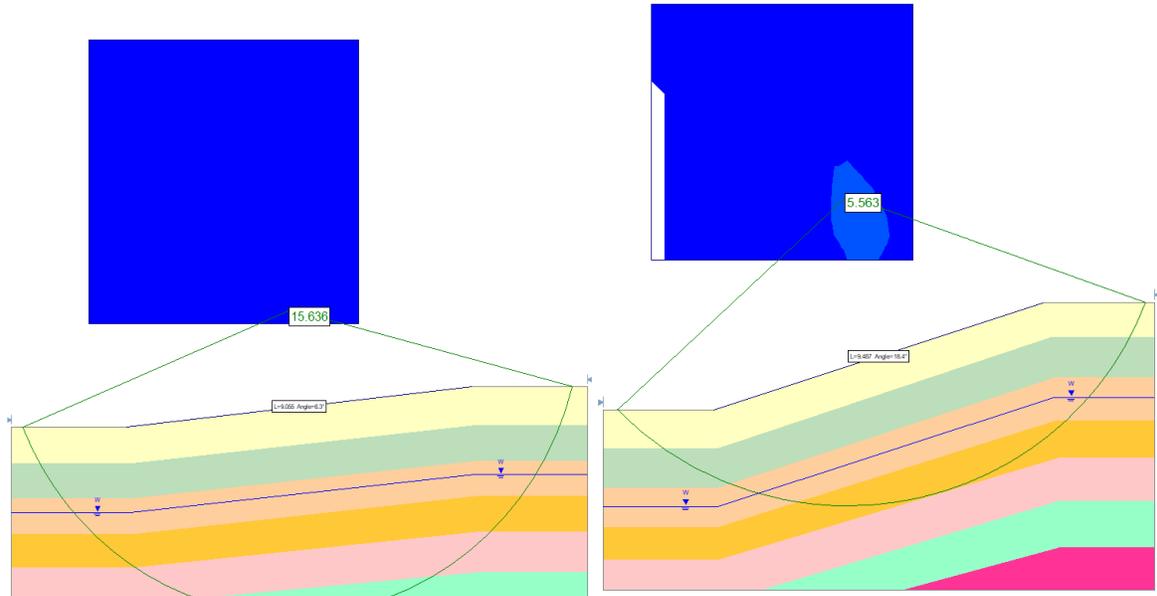


Ilustración 32: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 6.3°

Ilustración 33: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 18.4°

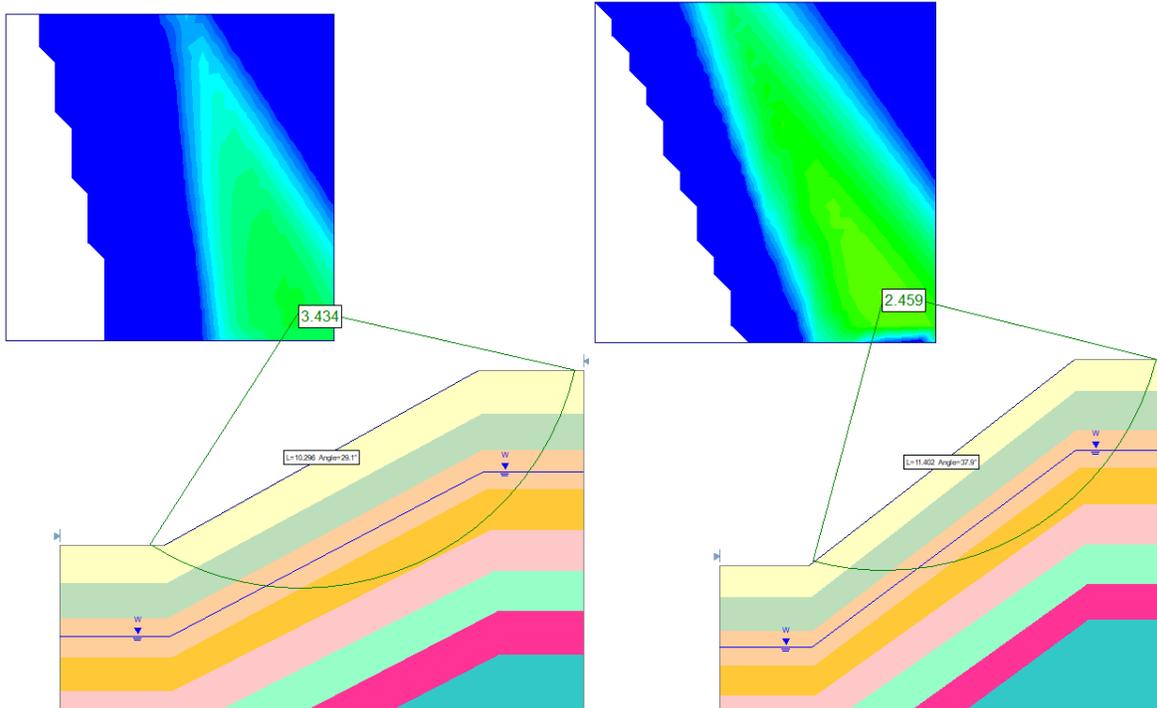


Ilustración 34: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 29.1°

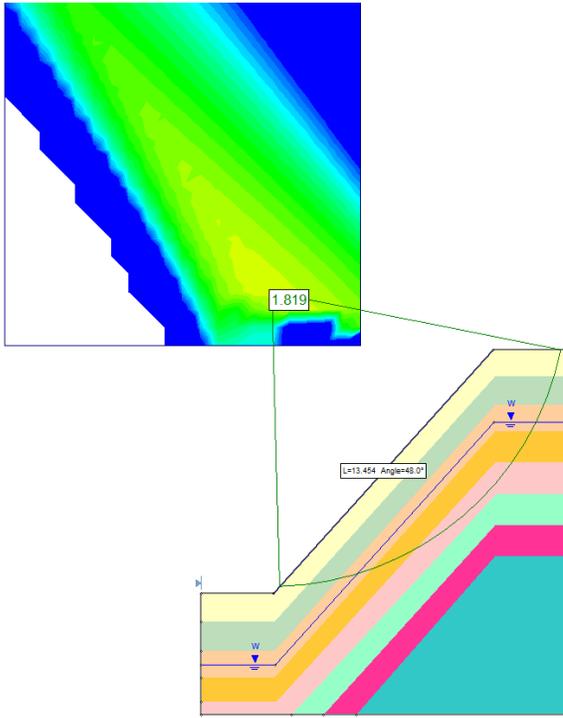


Ilustración 35: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 37.9°

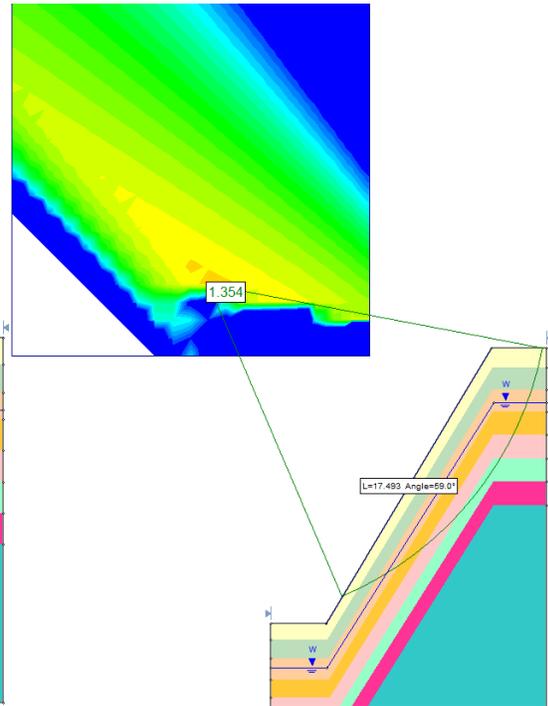


Ilustración 36: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 48°

Ilustración 37: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 59°

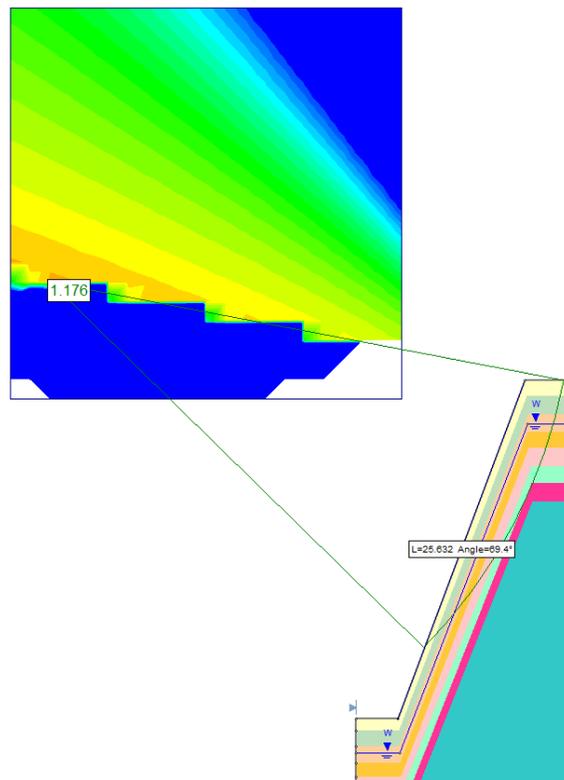


Ilustración 38: modelo de suelo arcilloso con pendiente de 69.4°

En las siguientes figuras se muestran los modelos obtenidos para las pendientes analizadas donde se utilizaron los estratos de la tabla 9 pertenecientes a suelos granulares. Los resultados de los modelos se pueden observar en la tabla 12.

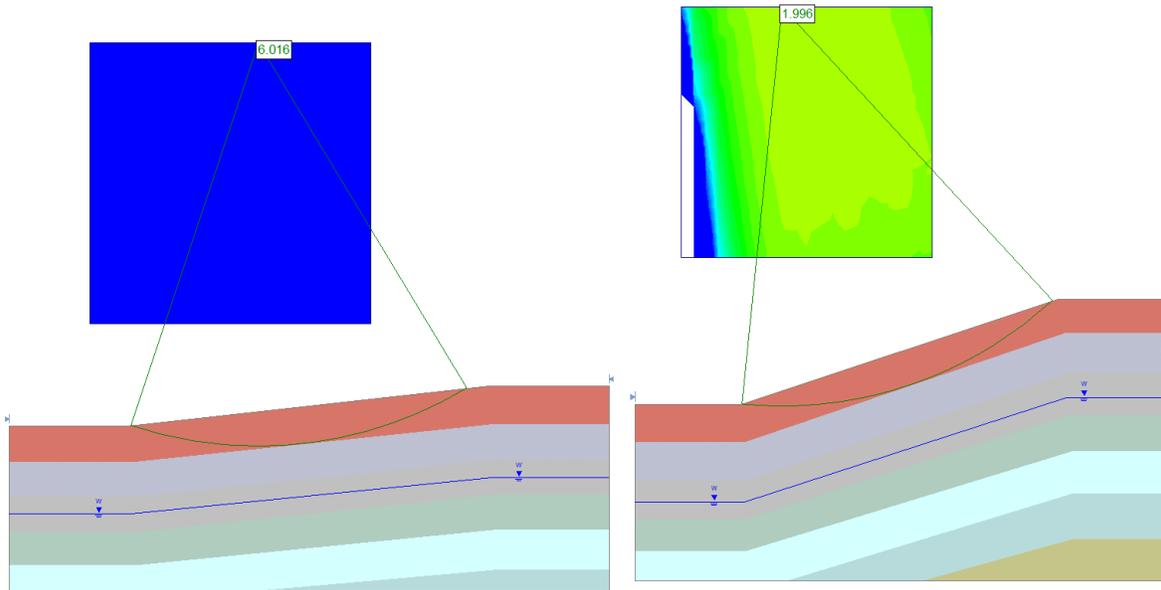


Ilustración 39: modelo de suelo granular con pendiente de 6.3°

Ilustración 40: modelo de suelo granular con pendiente de 18.4°

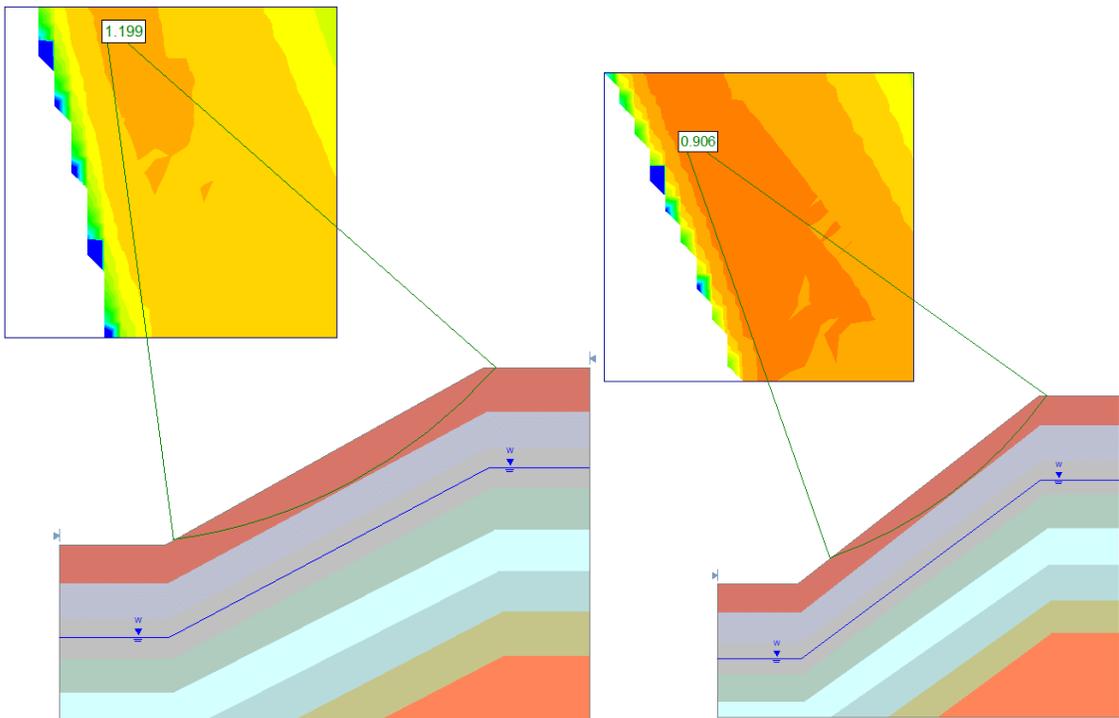


Ilustración 41: modelo de suelo granular con pendiente de 29.1°

Ilustración 42: modelo de suelo granular con pendiente de 37.9°

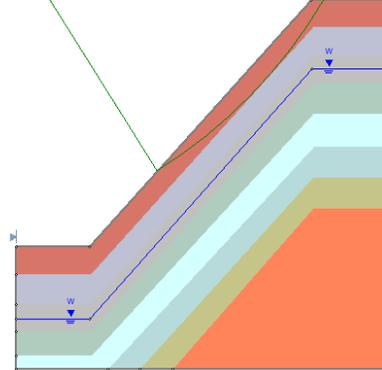
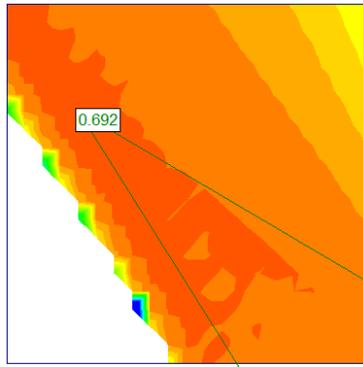


Ilustración 43: modelo de suelo granular con pendiente de 48°

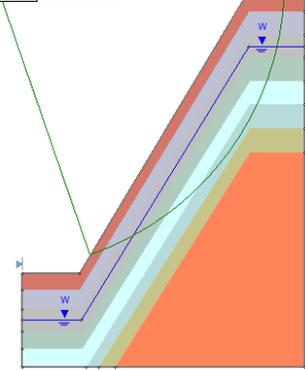
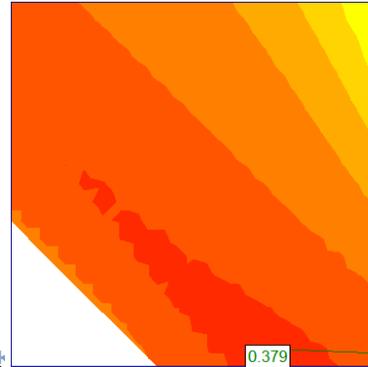


Ilustración 44: modelo de suelo granular con pendiente de 59°

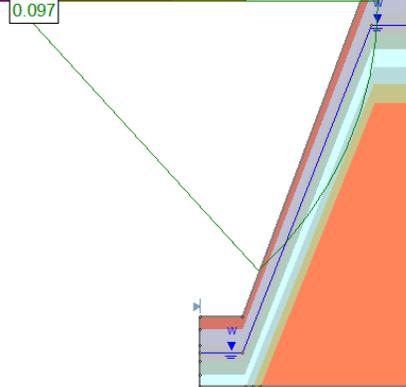


Ilustración 45: modelo de suelo granular con pendiente de 48°

En las siguientes figuras se muestran los modelos reforzados con trinchos de guadua obtenidos para la analizadas donde se utilizaron los estratos de la tabla 8 pertenecientes a suelos granulares. Los resultados de los modelos se pueden observar en la tabla 16.

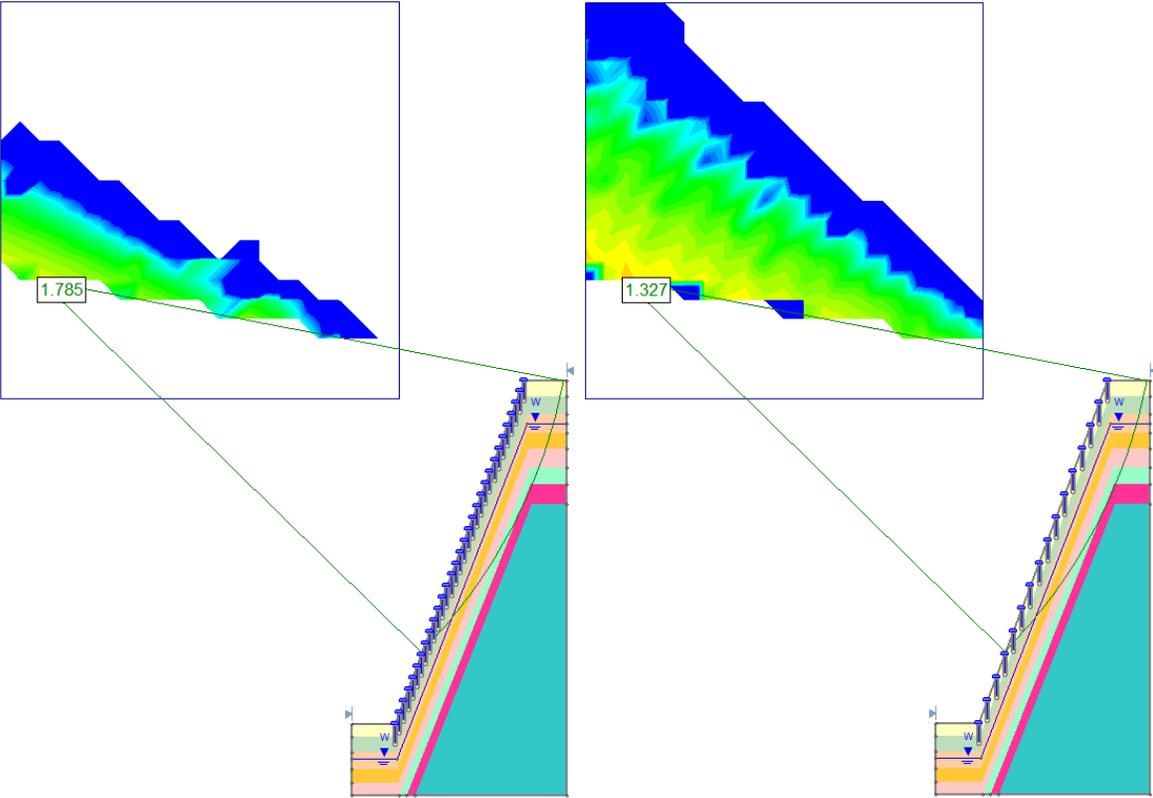
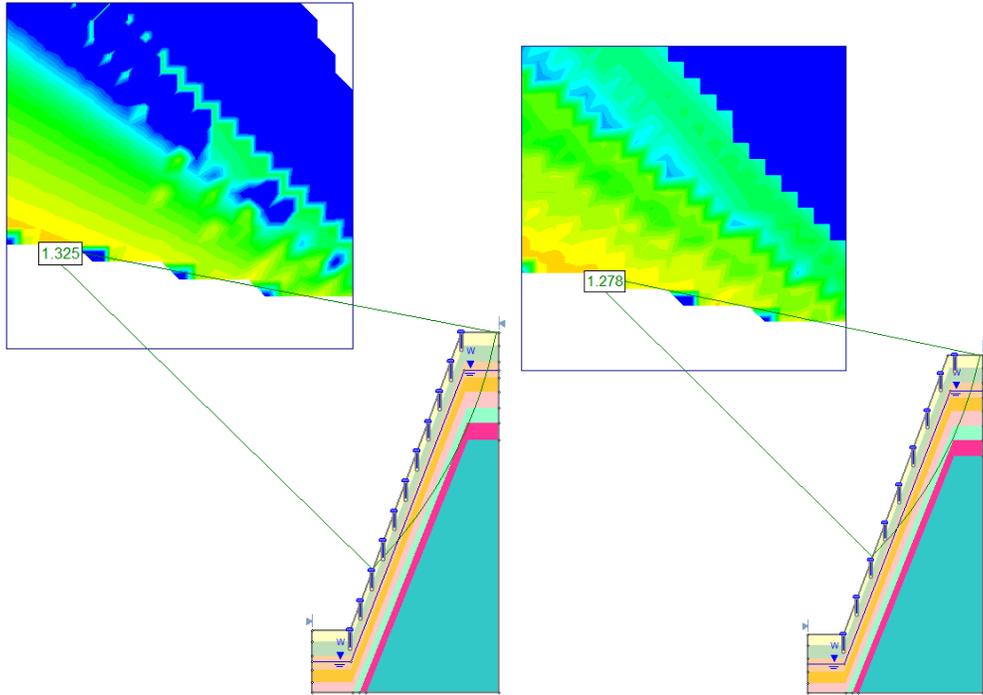
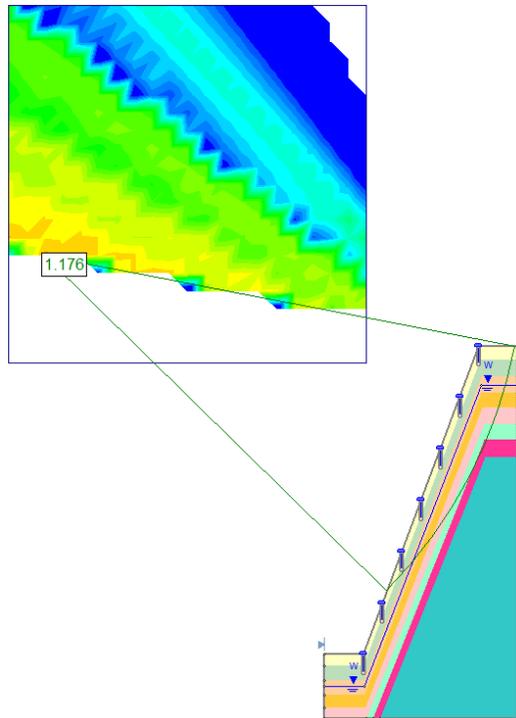


Ilustración 46: Talud 0.3m de espaciamiento en arcilla. Ilustración 47: Talud 0.6m de espaciamiento en arcilla.



*Ilustración 48: Talud 0.9m de espaciamiento en arcilla. Ilustración 49: Talud 1.2m de espaciamiento en arcilla.*



*Ilustración 50: Talud 1.5m de espaciamiento en arcilla.*

En las siguientes figuras se muestran los modelos reforzados con trinchos de guadua obtenidos para la analizadas donde se utilizaron los estratos de la tabla 9 pertenecientes a suelos granulares. Se muestran los modelos para las diferentes profundidades:

- Modelos con  $H=1.4\text{m}$ : presentan los modelos que dan los resultados de la tabla 18.

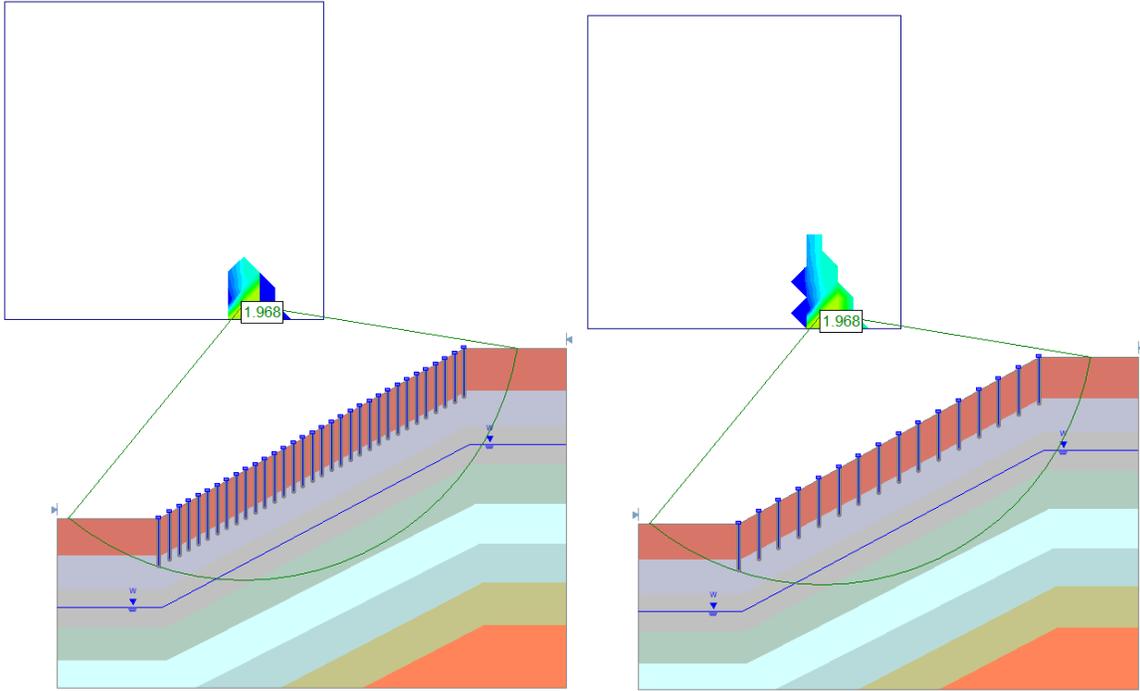


Ilustración 51: Talud 0.3m de espaciamiento y  $H=1.4\text{m}$  G. Ilustración 52: Talud 0.6m de espaciamiento y  $H=1.4\text{m}$  G.

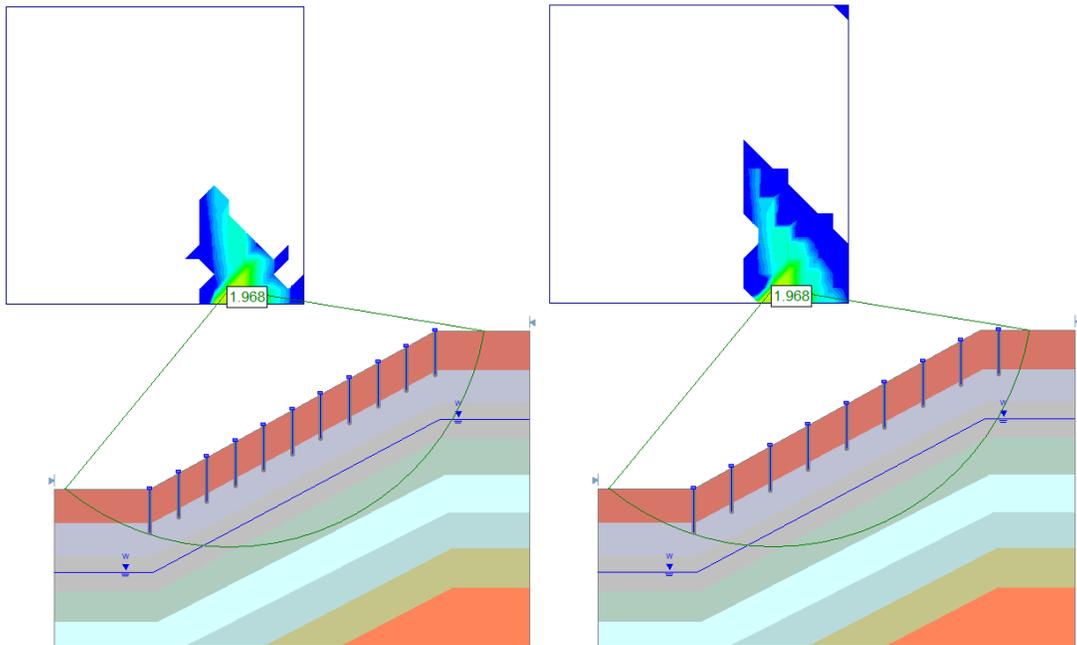


Ilustración 53: Talud 0.9m de espaciamiento y  $H=1.4\text{m}$  G. Ilustración 54: Talud 1.2m de espaciamiento y  $H=1.4\text{m}$  G.

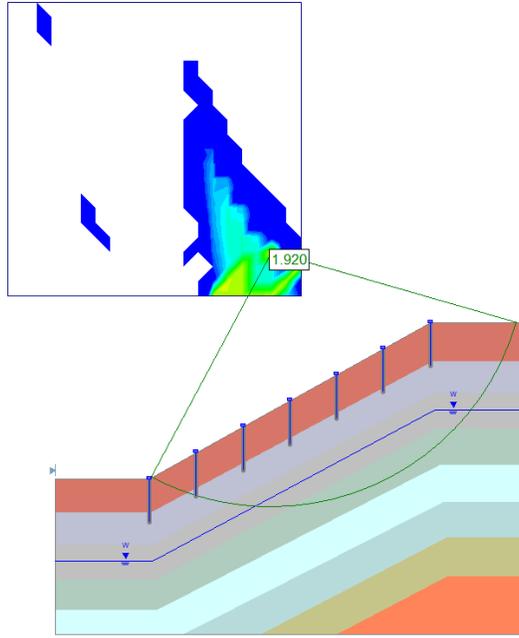


Ilustración 55: Talud 1.5m de espaciamento y H=1.4m G.

- Modelos con H=1.9m: presentan los modelos que dan los resultados de la tabla 19.

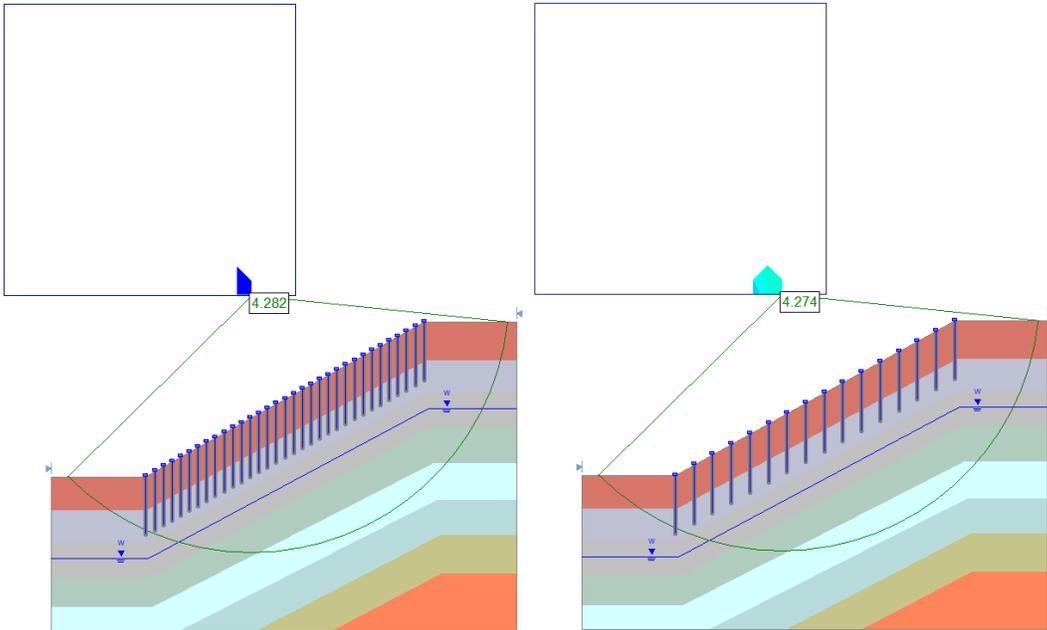


Ilustración 56: Talud 0.3m de espaciamento y H=1.9m G. Ilustración 57: Talud 0.6m de espaciamento y H=1.9m G.

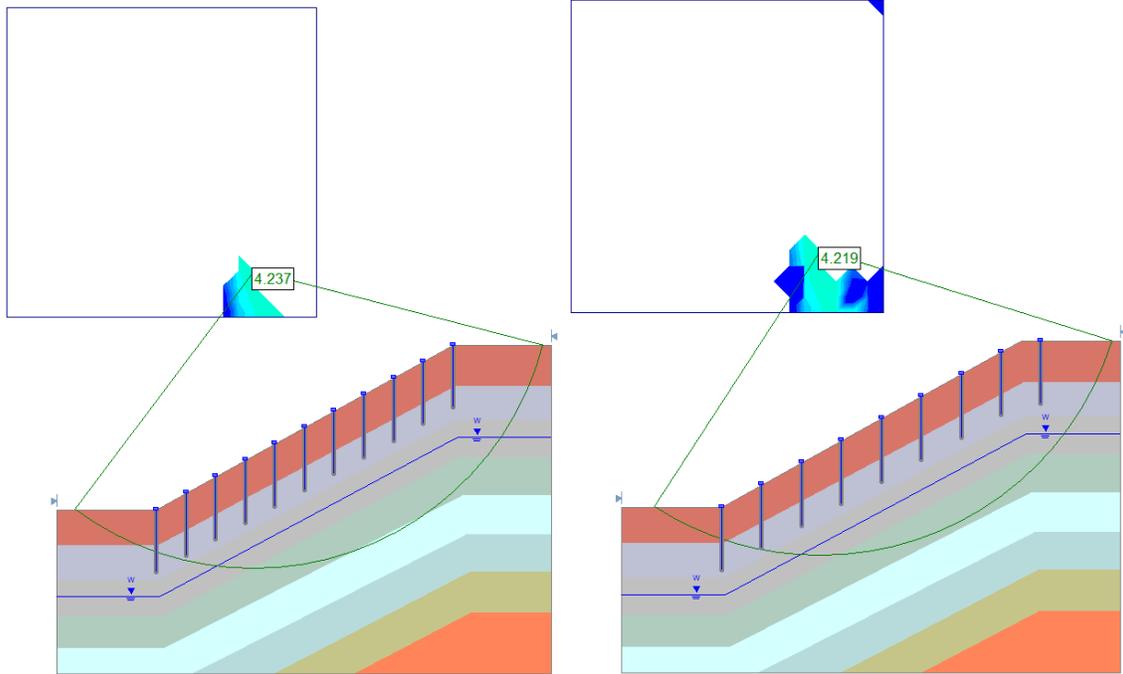


Ilustración 58: Talud 0.9m de espaciamento y  $H=1.9m$  G. Ilustración 59: Talud 1.2m de espaciamento y  $H=1.9m$  G.

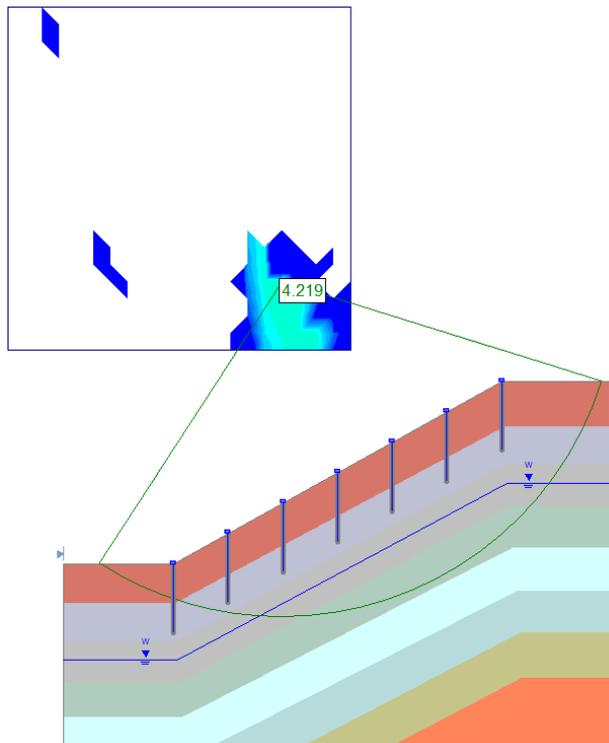


Ilustración 60: Talud 1.5m de espaciamento y  $H=1.9m$  G.

- Modelos con  $H=0.9m$ : presentan los modelos que dan los resultados de la tabla 20.

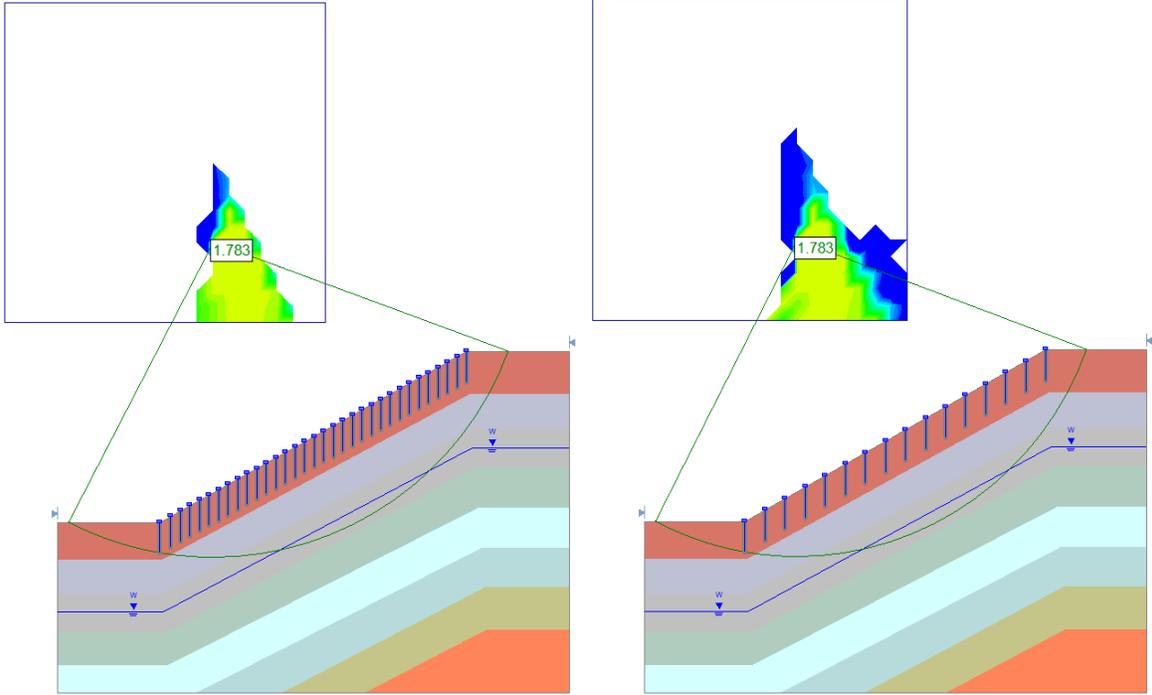


Ilustración 61: Talud 0.3m de espaciamento y H=0.9m G. Ilustración 62: Talud 0.6m de espaciamento y H=0.9m G.

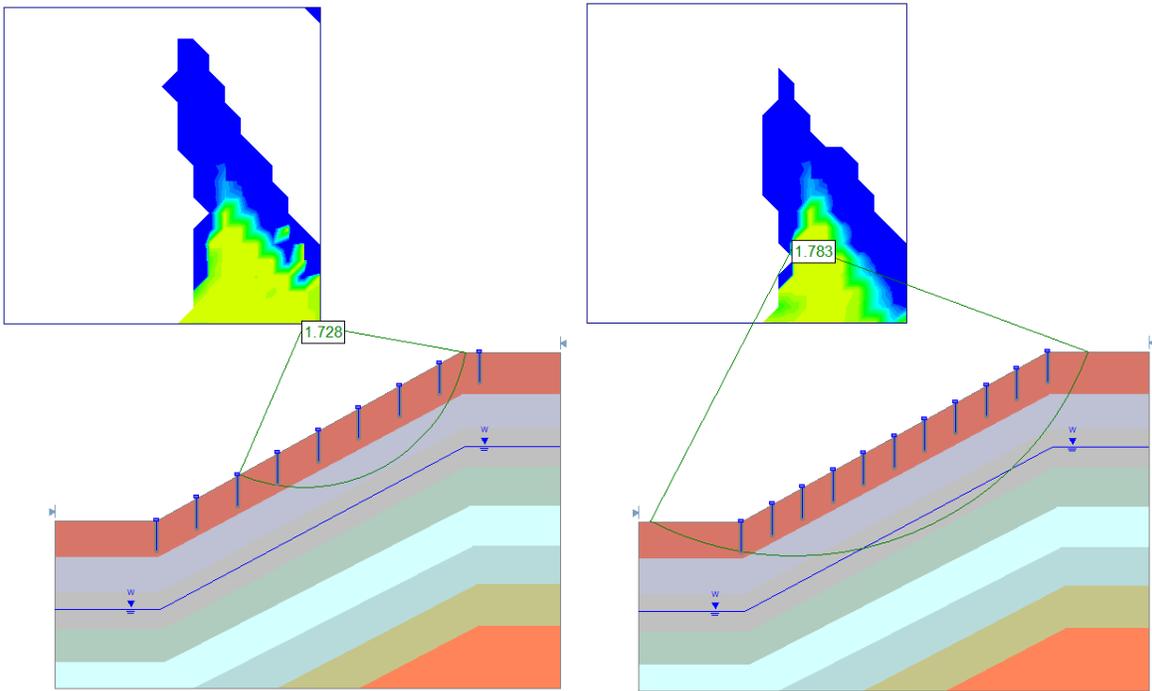
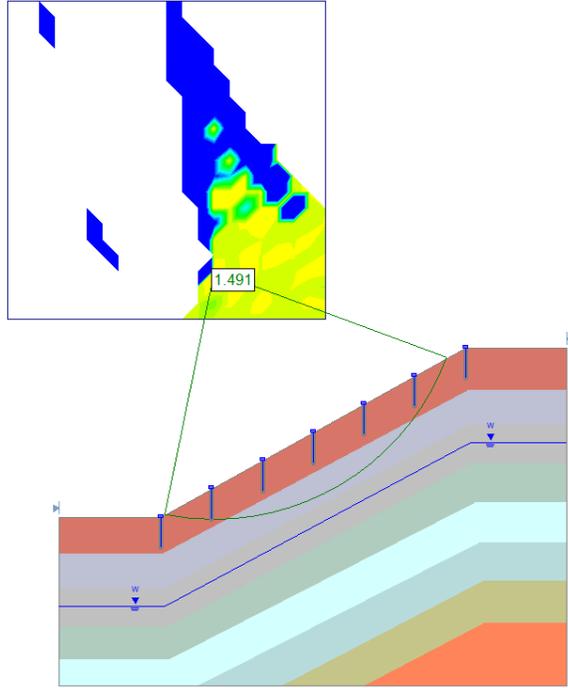


Ilustración 63: Talud 0.9m de espaciamento y H=0.9m G. Ilustración 64: Talud 1.2m de espaciamento y H=0.9m G.



*Ilustración 65: Talud 1.5m de espaciamento y H=0.9m G.*