

# Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con vetiver

## Assessment of shear strength parameters on steep soils covered with vetiver

JESSIKA MAGRETH HERRERA PASSOS<sup>1</sup> - JOSÉ VICENTE AMÓRTEGUI GIL<sup>2</sup>

1. Maestría en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

jessika.herrera@mail.escuelaing.edu.co - jose.amortegui@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/02/2017 Aceptado: 25/04/2017

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

### Resumen

Las laderas están expuestas a procesos de erosión y de meteorización que imponen una pérdida de resistencia de los materiales térreos. El vetiver tiene la capacidad de retener las partículas de suelo con sus macollas y de reforzar el terreno con las raíces, induciendo resistencia a la tracción, que se manifiesta como un incremento en los valores de los parámetros de resistencia al corte del terreno.

El sistema vetiver plantea una solución particular a este problema. Al ser dispuesto de manera sistemática en la ladera, no sólo aumenta la cobertura vegetal superficial, controlando procesos erosivos superficiales, sino que también mejora las condiciones de estabilidad, influenciando los materiales térreos en profundidad.

Esta investigación se centró en el estudio de la influencia de las raíces en la resistencia al corte del suelo, siguiendo el criterio de falla de Mohr-Coulomb y en la simulación de estas condiciones en función de la estabilidad de la ladera. Los resultados obtenidos muestran un claro aumento de las propiedades de resistencia del suelo y un efecto beneficioso en función de los análisis de estabilidad realizados, lo que permite concluir que este sistema es eficiente, en términos de las condiciones analizadas, para el aumento de las propiedades de resistencia del suelo.

**Palabras claves:** vetiver, raíces, resistencia al corte, corte directo.

### Abstract

In places where superficial erosion and subsequent processes of instability due to loss of soil resistance take place, reinforcement systems that focus on protecting the superficial soil, improving the topsoil layer, and using them as a reinforcement system are needed.

Vetiver enables a solution to this problem. Being systematically arranged on the side, not only does it increase the surface vegetation cover but controls the surface erosion and improves the conditions influencing slope stability.

This research focused on the influence of roots in the soil shear strength following the Mohr-Coulomb fault criteria. The results of shear strength tests show a clear increase in the strength properties of the soil and a beneficial effect, depending on the stability analysis performed. It is concluded that vetiver increases the strength properties of the soil efficiently in terms of the conditions analyzed.

**Keywords:** vetiver, roots, soil shear strength, direct cut.

## INTRODUCCIÓN

El vetiver (*Vetiveria zizanioides*) es una planta de la familia de las gramíneas, nativa de la India. Sus tallos erguidos alcanzan una altura que oscila entre 0,5 y 1,5 m, las hojas son relativamente rígidas, largas y angostas, y tienen hasta 75 cm de largo y no más de 8 mm de ancho.

Esta planta crece con facilidad en distintos tipos de suelo, ya sean arenosos, arcillosos o incluso en zonas donde la capa vegetal es escasa. Además, es resistente a diferentes condiciones climáticas, inundaciones y hasta agentes contaminantes.

Una de las mayores virtudes del vetiver son sus raíces, las cuales crecen verticalmente y su afectación en área se limita a menos de un metro de diámetro alrededor de la planta. Las raíces pueden llegar a alcanzar longitudes de 5 m, generando una barrera en el subsuelo. El crecimiento de las raíces de la planta es bastante acelerado en comparación con el de otras plantas, hasta el punto de que en el primer año alcanza una profundidad de 4 m.

Debido a estas características, el vetiver se ha utilizado para mejorar las condiciones de las laderas, con resultados satisfactorios en muchos casos.

En el presente artículo se muestra la influencia del vetiver en la resistencia al corte, medido en ensayos de corte directo sobre muestras de suelo. Se analizan las propiedades geomecánicas en función de las características típicas de las muestras y se simula dicho comportamiento con modelos de equilibrio límite para la obtención del valor del factor de seguridad, en los análisis de estabilidad.

## MATERIALES Y METODOLOGÍA

Se definen dos clases de muestras. La primera es la correspondiente a los materiales naturales e inalterados, llamados muestras de control. La palabra *control* se refiere a que estas muestras presentan características base, una medida estándar para los posteriores análisis.

La segunda corresponde a las muestras en cuya composición se encuentran las raíces de la planta. La condición de granulometría de la muestra se ve alterada a causa de la presencia de raíces, por lo cual las muestras se tomaron de la misma zona respecto al centro de la planta, asegurando homogeneidad entre las muestras obtenidas.

Como se mencionó anteriormente, se realizaron ensayos de corte directo para el análisis de las propiedades

geomecánicas de los materiales, siguiendo el criterio de falla de Mohr-Coulomb. Los ensayos hechos corresponden a las tres modalidades típicas (Consolidado drenado, Consolidado no drenado y No consolidado no drenado) (tabla 1).

No obstante, debido a que para la caracterización del material en función del criterio de falla es necesario que los esfuerzos medidos sean efectivos, la construcción de las envolventes de falla y el análisis de parámetros geomecánicos se centraron en los ensayos de corte directo consolidados drenados. Los otros ensayos se utilizaron para la descripción del terreno, mas no para la cuantificación del efecto de las raíces sobre las muestras.

**Tabla 1**  
Número de ensayos hechos

Tipo de muestra	Condición	Modalidad del ensayo	Número de ensayos
SM	Sin vetiver	Consolidado drenado (CD)	2
SM	Con vetiver	Consolidado drenado (CD)	4
SM	Sin vetiver	Consolidado no drenado (CU)	3
SM	Con vetiver	Consolidado no drenado (CU)	3
SM	Sin vetiver	No consolidado no drenado (UU)	3
SM	Con vetiver	No consolidado no drenado (UU)	3
SM-SC	Sin vetiver	Consolidado drenado (CD)	1
SM-SC	Con vetiver	Consolidado drenado (CD)	4
SM-SC	Sin vetiver	Consolidado no drenado (CU)	2
SM-SC	Con vetiver	Consolidado no drenado (CU)	2
SM-SC	Sin vetiver	No consolidado no drenado (UU)	1
SM-SC	Con vetiver	No consolidado no drenado (UU)	1

El procedimiento más utilizado para la obtención de los parámetros de resistencia al corte, de acuerdo con el criterio de falla de Mohr-Coulomb, es el siguiente: tras hacer, al menos, tres veces el ensayo de corte directo

con diferentes niveles de esfuerzo normal, se construyen las curvas de esfuerzo normal contra esfuerzo cortante y se traza una línea recta que genere el mejor promedio entre los valores de picos de esfuerzo cortante obtenidos. Esta recta corresponde a la envolvente de falla, cuya inclinación es equivalente al ángulo de fricción y el intercepto con el eje de las ordenadas a la cohesión del material.

Debido a que el ensayo de corte directo es un ensayo de deformación controlada, se intuye que la muestra llega a la falla cuando la variación de la fuerza cortante, y a su vez la variación del esfuerzo cortante llega a una tasa fija, en este punto se asocia el estado de esfuerzos final con los esfuerzos de falla de la muestra ensayada, o lo que es lo mismo, que el círculo de Mohr es tangente a la envolvente de falla.

En las anteriores condiciones se graficó el nivel de deformación horizontal, con el correspondiente ángulo de la envolvente y con el corte con el eje de las ordenadas. Teniendo claro que cuando estas curvas se vuelvan asintóticas a un valor fijo, se ha llegado a la envolvente de falla, o lo que es lo mismo, a los valores de ángulo de fricción interna del material y su cohesión correspondiente.

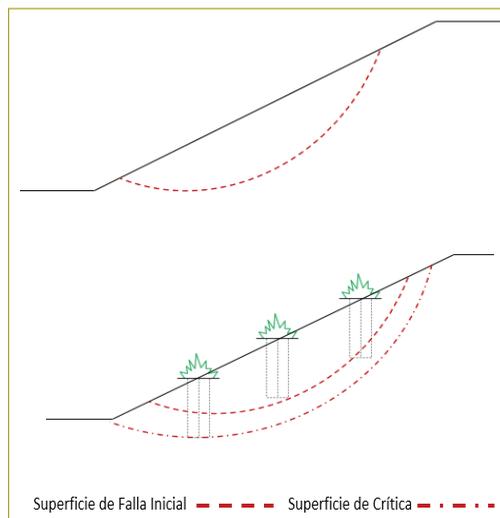
Además de la obtención de la variación de los parámetros de resistencia de las muestras de control y de las muestras con raíces, se analizó, en función de la deformación horizontal, el desarrollo de la resistencia pico de los materiales, y en función de este análisis se lanzó la hipótesis de cómo las raíces influyen en la resistencia del suelo.

Como complemento a los análisis de los parámetros geomecánicos, se evaluó la influencia de las raíces en la estabilidad de la ladera. El análisis de estabilidad se llevó a cabo con modelos de equilibrio límite, en los que se parte de un talud homogéneo con una inclinación definida y en función de ésta se determina el factor de seguridad. Se construyen curvas que relacionan la inclinación del talud, el factor de seguridad y la presencia o no de las raíces en la muestra (figura 1).

## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Deformación vertical de las muestras

Al graficar la deformación vertical que las muestras experimentaron durante los ensayos realizados, se observó que tanto las muestras de control como las muestras con



**Figura 1.** Esquema de las superficies de falla en el análisis de estabilidad.

raíces experimentaron un aumento en la deformación vertical a medida que el ensayo se desarrollaba.

La deformación vertical en el ensayo de corte directo está directamente asociada a la variación del volumen de la muestra, debido a que el desplazamiento en esta dirección es el único que no se encuentra restringido. Así pues, si el desplazamiento vertical es positivo (figuras 2 y 3), habrá un aumento de volumen de la muestra.

Es evidente que el nivel de deformación para las muestras de control y para las muestras con raíces es muy similar. Para deformaciones entre el 0 y 10 %, la deformación vertical crece en una tasa relativamente constante; luego de este nivel de deformación horizontal se presente un leve descenso, con una tasa nula para ciertos momentos del ensayo. En adelante, la deformación vertical asciende a una tasa variable pero cada vez más baja.

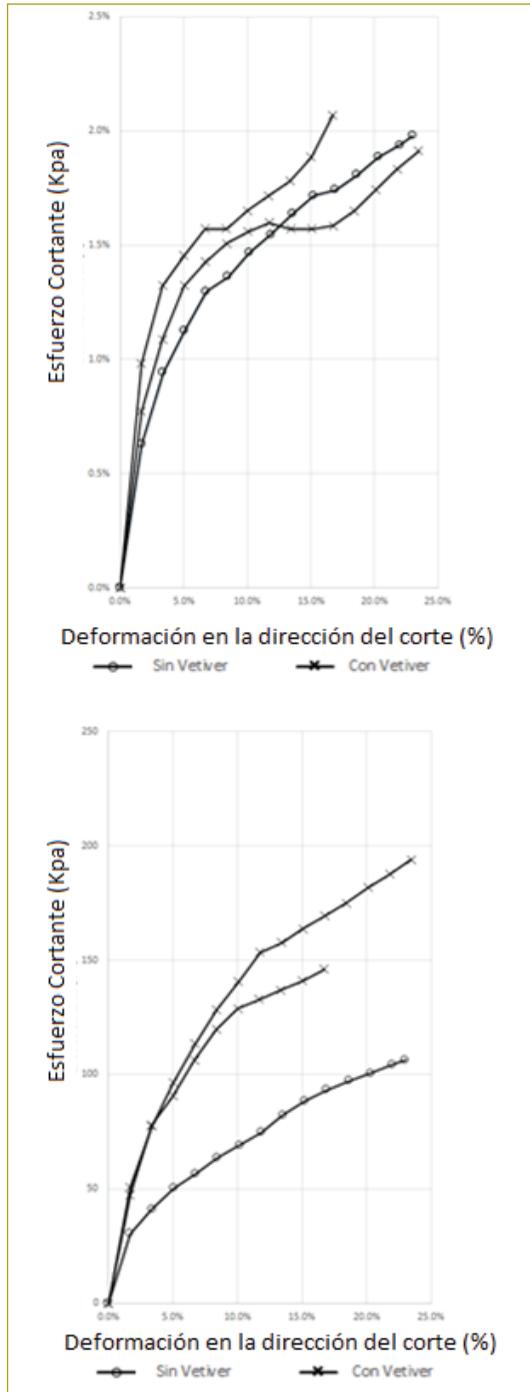
Las mayores deformaciones verticales que se registraron se presentaron en la arena limosa. Éstas desarrollaron un 0,5 % más de deformación vertical que las que tuvo la arena arcillo limosa.

### Esfuerzos cortantes durante los ensayos

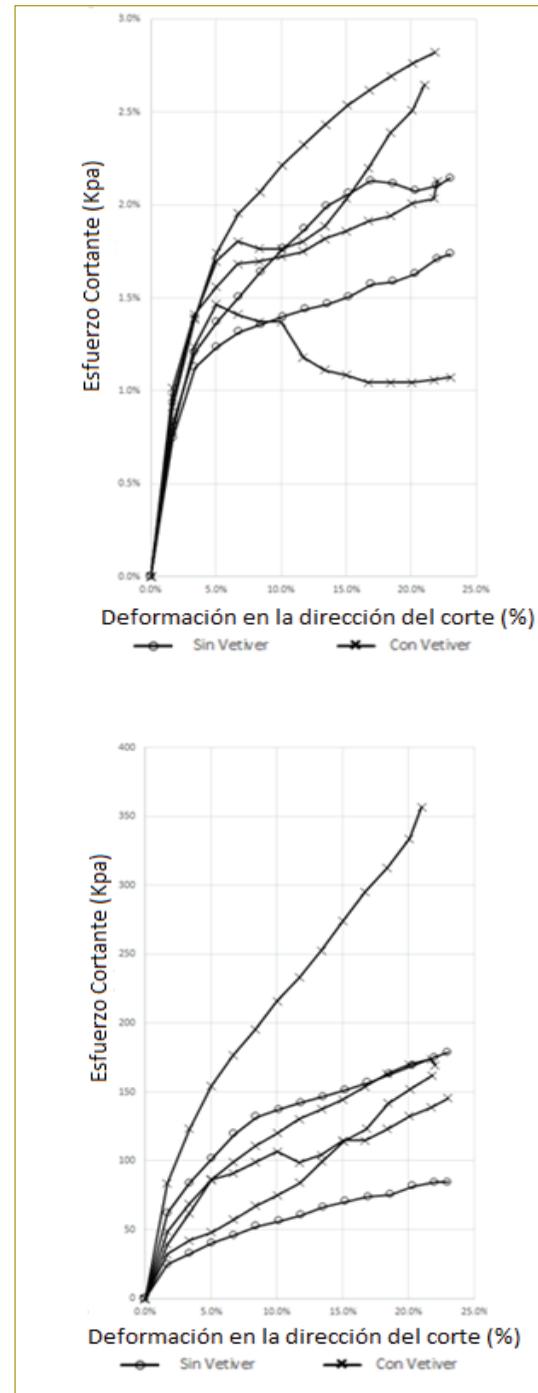
A diferencia de las deformaciones verticales, las cuales fueron las mismas tanto para las muestras de control como para las muestras con raíces en su composición, los esfuerzos cortantes que se desarrollaron durante el ensayo de corte sí cambiaron considerablemente para cada tipo de muestra.

A medida que se ejecuta el ensayo, el área donde se desarrolla el esfuerzo cortante es menor. Al mismo tiempo, la deformación acumulada en la muestra hace que, en función de la deformación, las fuerzas que mantienen la muestra unida desciendan hasta un valor constante.

Lo anterior se traduce en un incremento del esfuerzo cortante a medida que la deformación de corte aumenta. Esta tendencia es fija hasta alcanzar la deformación máxima, en cuyo caso, la tasa en la que crece el esfuerzo cortante se vuelve constante. En este punto se ha llegado a la falla de la muestra



**Figura 2.** Deformación vertical y esfuerzo cortante en función de la deformación horizontal – arena arcillo limosa – ensayo consolidado drenado.



**Figura 3.** Deformación vertical y esfuerzo cortante en función de la deformación horizontal – arena arcillo limosa – ensayo consolidado drenado.

En este caso, la tendencia es clara. Las muestras de control desarrollan esfuerzos cortantes bastante menores que las muestras con raíces, esto en función de la deformación de corte. Adicionalmente, la tendencia del esfuerzo cortante para las muestras con vetiver no sigue una línea recta, como se esperaría; cambian de pendiente, y ocasionalmente se eleva la tasa en que el cortante aumenta.

### Análisis de estabilidad

Una parte del trabajo ingenieril corresponde al análisis de parámetros geomecánicos y su cuantificación en función de una ley de rotura.

No obstante, es necesario traducir los parámetros obtenidos en función de la estabilidad de la ladera. Con este objetivo se simuló la variación del factor de seguridad de taludes homogéneos, de pendientes definidas, teniendo en cuenta la variación de parámetros identificada con anterioridad.

Como resultado de los análisis del ensayo de corte directo, se obtuvieron los parámetros de análisis necesarios para la evaluación de los factores de seguridad de los taludes. Los parámetros consisten en la cohesión del material y el ángulo de fricción, tanto para la muestra de suelo como para el conjunto ensayado de suelo con presencia de raíces del vetiver (tabla 2).

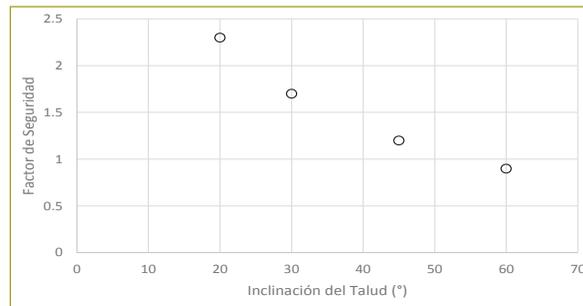
**Tabla 2**  
Parámetros de análisis

Nombre	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\varphi$ (°)
Suelo	21	5	32
Suelo y vetiver	19	65	37

### ANÁLISIS SIN VETIVER

El análisis sin vetiver consiste en la obtención del factor de seguridad de la ladera con parámetros geomecánicos fijos y sólo cambiando la inclinación de los taludes; su altura es fija, siempre de 5,0 m, y las pendientes evaluadas se utilizarán para formar una curva de pendiente contra factor de seguridad.

En la figura siguiente se agrupan los factores de seguridad obtenidos para cada pendiente analizada (figura 4).



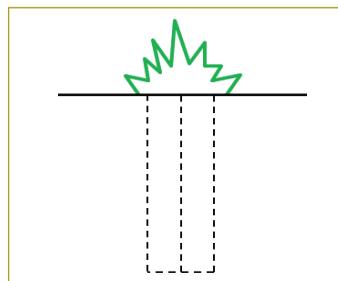
**Figura 4.** Variación del factor de seguridad en función de la inclinación del talud. Condición de control.

Como se observa, el factor de seguridad desciende a medida que la inclinación del talud aumenta, obtenido el valor de equilibrio límite (factor de seguridad igual a la unidad) cuando la inclinación de éste es cercana a 55°.

Esta condición es la condición de control. Así, con base en estos valores, se analizará la influencia de las raíces en la estabilidad de la ladera para las condiciones analizadas.

### ANÁLISIS CON VETIVER

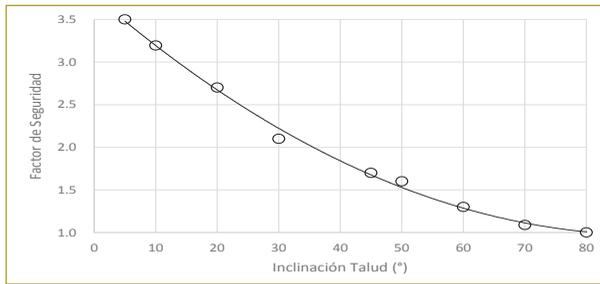
Tras obtener los valores del factor de seguridad en ausencia de vetiver, es posible configurar los taludes de modo tal que en las zonas donde se proyecta la disposición de la planta las propiedades del suelo cambien de manera que se simulen las condiciones de la ladera con vetiver.



**Figura 5.** Área de influencia de la planta.

Con este propósito se definieron cinco modelos de taludes con altura de 5 m, variando sus pendientes (20°, 30°, 45°, 50° y 60°), para los cuales se especificó un área de influencia de la siguiente manera; la profundidad corresponde a un cilindro de altura igual a 2,0

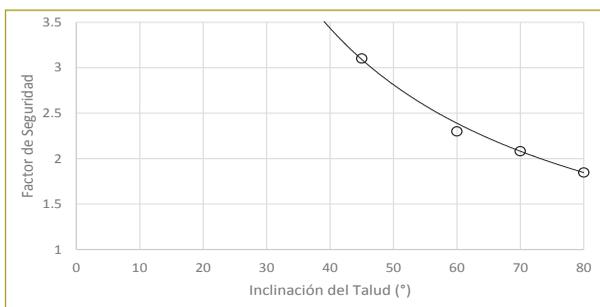
m (40 % de la altura total del talud) y un radio de 0,3 m, correspondientes al diámetro total de la macolla del vetiver. Una vez definida la geometría del modelo, se procede a introducir las propiedades de los materiales (suelo y planta), las cuales se obtuvieron mediante ensayos de laboratorio y campo (figura 5), en tanto que en la figura siguiente se agrupan los valores del factor de seguridad obtenidos tras el análisis (figura 6).



**Figura 6.** Variación del factor de seguridad en función de la inclinación del talud. Con vetiver, superficie de falla crítica.

Como se observa, el factor de seguridad desciende a medida que la inclinación del talud aumenta, obtenido el valor de equilibrio límite (factor de seguridad igual a la unidad) cuando su inclinación es cercana a 70°.

El anterior análisis correspondió a la superficie de falla con el menor factor de seguridad, y no al análisis de la superficie obtenida en el análisis sin la presencia de la planta (condición de control), por lo cual se estudia nuevamente el factor de seguridad de la ladera, teniendo fija la superficie de falla obtenida en el análisis sin vetiver.



**Figura 7.** Variación del factor de seguridad en función de la inclinación del talud. Con vetiver, superficie de falla inicial.

Como se puede apreciar, hay un aumento considerable de los factores de seguridad obtenidos; pese a que éste no es el factor de seguridad crítico de la ladera, es una buena forma de aproximarse al análisis de la influencia del vetiver en su estabilidad (figura 7).

**Tabla 3**

Parámetros obtenidos de los ensayos de corte directo

Material	Condición	C (kPa)	Phi (°)
SM	Sin vetiver	5	32
SM	Con vetiver	65	37
SM-SC	Sin vetiver	44	25
SM-SC	Con vetiver	67	34

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Es evidente que la presencia de vetiver en las muestras, a la luz del ensayo de corte directo, tiene influencia en el comportamiento de la muestra y en los parámetros de resistencia, según el criterio de falla de Mohr-Coulomb.
- Generalmente, las deformaciones verticales registradas durante los ensayos de corte directo son muy similares para las muestras con vetiver y sin éste.
- Si bien las deformaciones verticales son similares para los dos tipos de muestras, los esfuerzos registrados son mayores para las muestras que tienen vetiver en su composición.
- Los parámetros de resistencia, cohesión y ángulo de fricción obtenidos en los ensayos son claramente mayores para las muestras con vetiver (tabla 3).
- La tendencia observada en las figuras de cohesión y deformación de corte, para las muestras con raíces en su composición, muestra una tendencia ascendente del valor de la cohesión. Esto se debe a que para los niveles de deformación del ensayo de corte directo, las raíces presentes en las muestras no fallan.
- En general, la presencia de vetiver es favorable a la resistencia de los materiales.
- El aumento de la cohesión de las muestras con raíces se debe a que las raíces presentes se alinean sobre la superficie de corte, y si ésta es lo suficientemente larga, la raíz se ve sometida a esfuerzos de tracción. Este fenómeno otorga a la muestra una resistencia adicional a la tracción, así como un aumento en el valor de cohesión (figura 8).

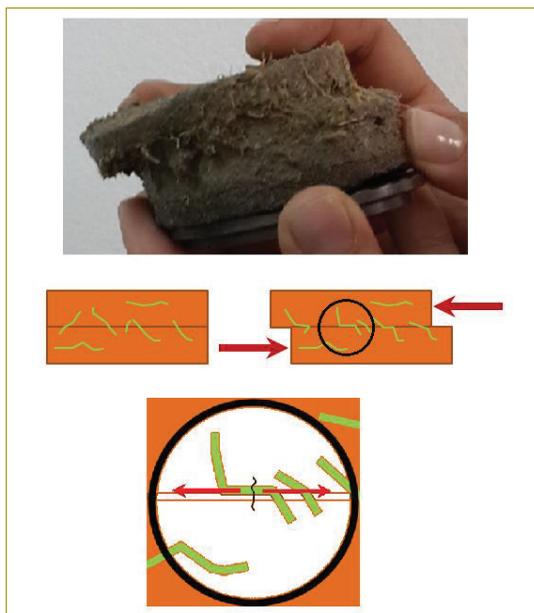


Figura 8. Raíces en el corte directo.

- En la figura siguiente, en la que se agrupan los factores de seguridad obtenidos tras el análisis de estabilidad de los taludes con la presencia del vetiver y sin éste, se puede apreciar que es evidente el aumento del factor de seguridad tras la simulación del efecto de la planta en los taludes (figura 9).

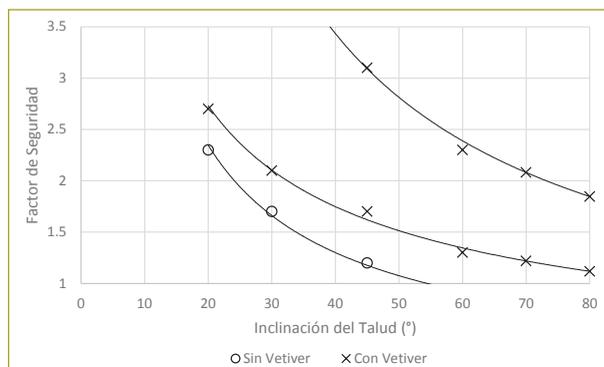


Figura 9. Análisis del factor de seguridad.

- La influencia del factor de seguridad con la superficie de falla crítica es mucho menor que el valor obtenido para la superficie de falla inicial, algo que es de esperarse, ya que el aumento de las propiedades del suelo no sólo influencia el factor de seguridad, sino también la forma como el talud se comporta frente a fenómenos que lo pueden llevar a la inestabilidad.
- Si bien la influencia de las raíces es evidente, para determinar los valores finales de cohesión y ángulo de fricción en las muestras con vetiver es necesario ejecutar ensayos de resistencia al corte con niveles de deformación mayores que los del ensayo típico.
- Respecto al análisis de estabilidad, la presencia de vetiver en el suelo lleva a que la superficie de falla crítica se encuentre más profunda en relación con la evaluada sin la planta. Adicionalmente, la masa de suelo, en presencia de las raíces, puede experimentar mayores niveles de deformación sin llegar a la falla, o eventualmente hacer de la falla un proceso más lento y no súbito, como sucedería en ausencia de la planta en la masa de suelo.
- El vetiver permite mayores deformaciones de la falla, sin que colapse el talud.

## REFERENCIAS

- Lin, D.-G. (2011). Estimating the effect of shear strength increment due to root on the stability of makino bamboo forest slopeland. *Journal of GeoEngineering*, 6 (2).
- Comino, E. & Druetta, A. (2009). *In situ Shear Tests of Soil Samples with Grass Roots in Alpine Environment*.
- Golssmith, W. (2006). *Soil Strength Reinforcement by Plants*.
- Xiao, H.-L. (2014). *Research on Direct Shear Test of Undisturbed Root-soil Composition*.
- Normaniza, O., Mohamad Nordin, A. & Che Hassandi, A. (2011). *Pull-Out and Tensile Strength Properties of Two Selected Tropical Trees*.
- Ram Chandra, T. (2011). *Simulation of Root-Reinforcement Effect in Natural Slopes Based on Progressive Failure in Soil-Root Interaction*.
- Sasumua, B., Nyandarua District, Kenya. Osano Simpson Nyambae (2011). *Root tensile strength of 3 typical plant species and their contribution to soil shear strength; a case study*.