

INFLUENCIA DEL SISTEMA RADICAL DE CUATRO ESPECIES VEGETALES EN LA ESTABILIDAD DE LADERAS A MOVIMIENTOS MASALES¹

Jorge Enrique Barrera Gutiérrez*; José Horacio Rivera Posada**; Miguel Eugenio Cadena Romero***

BARRERA G., J.E.; RIVERA P., J.H.; CADENA R., M.E. Influencia del sistema radical de cuatro especies vegetales en la estabilidad de laderas a movimientos masales. Revista Cenicafé 64 (2):59-77. 2013

Se evaluó el efecto de las raíces de *Trichanthera gigantea*, *Coffea arabica*, *Inga codonantha* y *Cordia alliodora* sobre la resistencia al cortante tangencial del suelo (*R.C.*) a 20, 80 y 120 cm de profundidad, en un suelo *Acrudoxic Melanudands* ubicado en la Estación Central Naranjal (Chinchiná, Caldas). Por cada especie se seleccionaron tres árboles adultos, se hicieron pruebas de corte directo empleando una caja metálica de 20x20x10 cm, sobre la cual se aplicaron esfuerzos tangenciales, a una velocidad que varió entre 0,25 y 0,44 mm.min⁻¹. La *R.C.* se determinó por medio de diagramas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria. Sobre las raíces presentes en el plano de falla se determinó el diámetro e índice de ocupación (*I.O.*). Se estableció la profundidad de la raíz principal y la extensión de raíces laterales. Los mayores promedios de *R.C.* se presentaron en el suelo con raíces de las especies arbóreas, así: 55,6 kPa en suelo con raíces de *C. alliodora* a 20 cm de profundidad, 70,5 kPa con raíces de *T. gigantea* a 80 cm y 76,0 kPa con raíces de *C. alliodora* e *I. codonantha* a 120 cm. Los menores valores de *R.C.* se registraron en el suelo sin raíces y con raíces de café (43,7 y 44,1 kPa, respectivamente, a 20 y 120 cm). Se obtuvieron coeficientes de correlación (*r*) positivos entre el incremento de la *R.C.* e *I.O.* (0,69 a 0,96). Los sistemas radicales de *C. alliodora* e *I. codonantha* alcanzaron una profundidad de 2,2 m y las raíces laterales hasta 10,7 y 5,5 m, respectivamente. Las raíces de *T. gigantea* y *C. arabica* alcanzaron hasta 1,6 y 0,60 m de profundidad y 5,0 y 1,2 m de longitud lateral, respectivamente.

Palabras clave: Suelo, café, raíces, resistencia al cortante tangencial, bioingeniería.

ROOT SYSTEM INFLUENCE OF FOUR BOTANICAL SPECIES IN THE HILLSIDE STABILITY AGAINST MASSAL MOVEMENTS

The effect of the roots of *Trichanthera gigantea*, *Coffea arabica*, *Inga codonantha* and *Cordia alliodora* on tangential shear resistance of the soil (*R.C.*) was evaluated at 20, 80 and 120 cm deep in soil *Acrudoxic Melanudands* located at the Experimental Station Naranjal (Chinchiná, Caldas). Three adult trees were selected for each species, direct shear tests were made using a metal box 20x20x10 cm, on which tangential forces were applied at a speed rate between 0.25 and 0.44 mm.min⁻¹. *R.C.* was determined by means of a soil tangential strength vs. a soil unitary deformation diagram. Diameter and occupancy index (*OI*) were determined on the roots present in the fault plane. The taproot depth and the lateral root length were established. The highest mean values of *R.C.* were found in the soil with roots of tree species as follows: 55.6 kPa in soil with *C. alliodora* roots at 20 cm of depth, 70.5 kPa with *T. gigantea* roots at 80 cm of depth, and 76.0 kPa with *C. alliodora* and *I. codonantha* roots at 120 cm of depth. The lowest values of *R.C.* were recorded in the soil without roots and roots of coffee (43.7 and 44.1 kPa, respectively, at 20 and 120 cm). Positive correlation coefficients (*r*) were obtained between the increase in *R.C.* and *O.I.* (0.69 to 0.96). Root systems of *C. alliodora* and *I. codonantha* reached a depth of 2.2 m and lateral roots up to 10.7 and 5.5 m, respectively. The roots of *T. gigantea* and *C. arabica* reached 1.6 and 0.60 m of depth and 5.0 and 1.2m of lateral length, respectively.

Keywords: Mass movement, soil, coffee, roots, soil shear strength, bioengineering.

¹Fragmento de tesis de grado del primer autor para optar al título de Ingeniero Forestal, Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá.

* Ingeniero Forestal.

** Investigador Científico II, Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

*** Profesor Titular Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

La bioingeniería del suelo es una ciencia aplicada que combina el uso de los principales diseños de ingeniería convencional con conceptos biológicos y ecológicos para construir y asegurar la supervivencia de las comunidades vegetales para controlar naturalmente la erosión y las inundaciones (3).

Lammeranner *et al.* (10), describen la bioingeniería como el enfoque adecuado para hacer frente a los problemas de erosión y deslizamientos de tierra poco profundos, arraigados especialmente en los países en desarrollo como Nepal. Esta técnica es una solución rentable por el uso de materiales disponibles a nivel local y mano de obra de bajo costo. Por otra parte, este enfoque permite la participación de la población local en los aspectos de gestión y mantenimiento.

La vegetación es un componente muy importante en la estabilidad del suelo en zonas de ladera, debido al refuerzo mecánico de sus raíces y la disminución de la presión de poros del suelo, causado por la evapotranspiración (14, 28). El efecto que las raíces tienen sobre la resistencia mecánica del suelo, se debe a que le permiten soportar la acción de cargas cortantes de gran magnitud que lo harían fallar en el caso de no contar con el refuerzo de ellas. En varios trabajos de investigación se ha encontrado que en los diagramas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria, los valores para las resistencias pico y residual son más altos y se alcanzan en rangos de deformación más amplios, que los logrados por el suelo libre de raíces (4, 25, 26, 27).

El efecto descrito anteriormente se debe a que cada raíz individual puede considerarse como una fibra elástica, que puede resistir grandes esfuerzos de tensión y que al estar adheridas al suelo le transmiten sus propiedades mecánicas,

conformando así un material compuesto y de resistencia alta al cortante (6). Este fenómeno es más representativo en especies con sistemas radicales profundos, como es el caso de los árboles, ya que sus raíces penetran varios metros, y por la acción de su propio peso aumentan la fricción entre los granos, generando una unión perfecta entre la matriz del suelo y cada raíz, haciendo que la resistencia a la tensión de cada una de ellas se transmita completamente y el efecto de refuerzo sea total (25, 26, 27). En algunos estudios de campo en suelos con diferentes usos, se ha encontrado que las raíces con diámetros entre 1 mm a 20 mm son las que tienen mayor resistencia mecánica a esfuerzos de tensión y, por lo tanto, las que más contribuyen en el aumento de la resistencia al cortante tangencial del suelo (23). Por lo tanto, los árboles mejoran la resistencia al cortante tangencial del suelo, ya que le transmiten las propiedades mecánicas de sus raíces por fricción, adhesión y cohesión.

La vegetación ribereña tiene un papel importante en la protección de las orillas de los ríos a través del sistema de raíces y la cubierta vegetal, la que mejora la agregación de las partículas del suelo en una situación de baja cohesión, la reducción de la escorrentía, erosión y sedimentación de los cauces de los ríos (7).

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la distribución del sistema radical de cuatro especies vegetales comunes en la Zona Cafetera Colombiana y su efecto sobre la resistencia del suelo al cortante tangencial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y descripción del sitio de estudio. El trabajo se realizó en la Estación Central Naranjal de Cenicafé, ubicada en

el municipio de Chinchiná, 04° 58' de latitud Norte y 75° 42' de longitud Oeste a 1.400 m de altitud, precipitación promedio anual de 2.646 mm. El sitio hace parte de una terraza disectada, recubierta por un manto continuo de cenizas volcánicas, con suelos clasificados como Unidad Chinchiná (*Acrudoxic Melanudands*), cuyo material parental son las cenizas volcánicas. Son suelos muy profundos, ricos en materia orgánica, bien drenados, y aireados, de negro a pardo muy oscuro en la superficie y pardo amarillentos en profundidad. Con texturas medianas, ácidos, alta retención de fosfatos, contenidos bajos de Ca, Mg, K y CIC alta (24).

Distribución de raíces. Se destapó el sistema radical de los árboles evaluados por cada especie, hasta encontrar la profundidad máxima a la que llegaba la raíz principal y la longitud de las raíces laterales. Se pesaron tres árboles de nogal cafetero.

Método de evaluación. Se seleccionaron tres árboles adultos de las especies: quiebrabarrigo (*Trichanthera gigantea*), café (*Coffea arabica*) variedad Caturra, guamo (*Inga codonantha*) y nogal cafetero (*Cordia alliodora*). Por cada especie, se realizaron seis pruebas de corte directo en cada una de las siguientes profundidades: 20 cm, 80 cm y 120 cm, para lo cual se empleó un equipo de muestreo metálico para muestras de suelo no disturbadas y una caja de corte metálica de dimensiones 20 x 20 x 10 cm, propuestos por Coker y Flores (2), para proteger la muestra en el sitio sin disturbar, mientras se aplicaba la fuerza tangencial que permitió romper el bloque de suelo. Con el fin de realizar comparaciones de resistencia al cortante tangencial, sin la influencia de raíces, se escogió como testigo un sitio libre de vegetación de tipo herbáceo, arbóreo o arbustivo, y se hizo la misma evaluación.

El equipo para el muestreo de suelos en el sitio y sin disturbar, se construyó con lámina de hierro de 1/8" de 30 x 30 cm de área, en cuyo interior tenía demarcado un cuadrado de 20 cm de lado, cuyo perímetro estuvo delineado por 40 hoyos de 1 cm de diámetro, acondicionados de tal forma que permitieran la introducción de 40 clavos de hierro de aproximadamente 1 cm de diámetro y 13 cm de longitud, con el fin de aislar la muestra en el sitio, sin disturbar. Cada uno de estos clavos tenían en su cabeza un tope metálico para facilitar su extracción manual, y conservar así la muestra intacta (Figura 1A). Este dispositivo se ubicó sobre la superficie del terreno nivelado (Figuras 1A y B) y manualmente se retiró el suelo sobrante de los lados y hacia abajo, luego de quitar los clavos, hasta aislar un bloque de suelo en el sitio, de 20 x 20 x 10 cm, que se cubrió por sus cuatro caras laterales con una caja metálica que tenía las mismas dimensiones del bloque, para la protección lateral de la muestra, mientras se ejercía la fuerza tangencial, para romperla (Figuras 1C y D).

En uno de los lados de la caja, se instaló una celda de carga que se conectó a un dinamómetro, con el que se obtuvieron las fuerzas de corte aplicadas con un gato mecánico. También se instaló un LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), el cual se conectó a un multímetro para medir el desplazamiento de la caja con la muestra de suelo (Figuras 2A y C). Por último, en la parte superior de las muestras de suelo se colocaron cargas con los siguientes valores de esfuerzo normal (Figura 2B): 5,99 kPa, 8,17 kPa, 10,9 kPa, 13,62 kPa, 16,34 kPa y 19,07 kPa.

Para cada profundidad dentro del perfil del suelo se hicieron seis pruebas de corte, utilizando un valor de esfuerzo normal

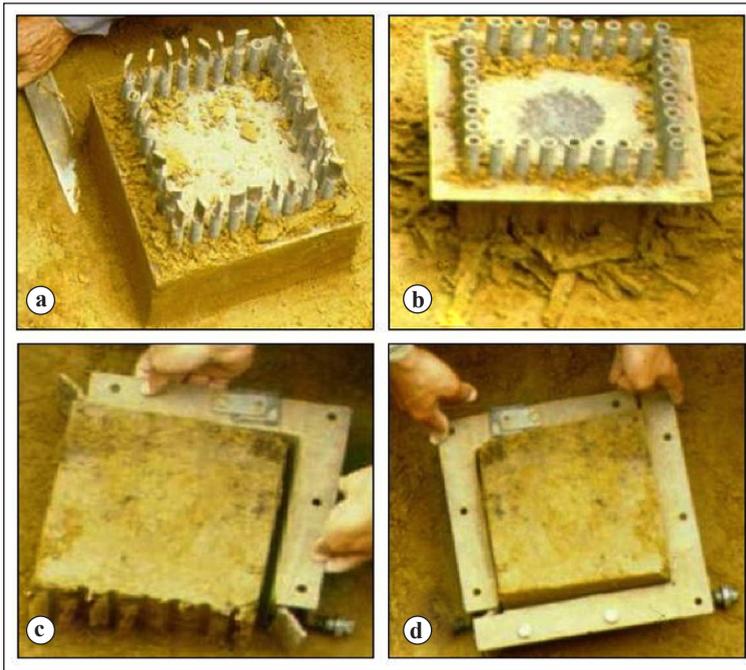


Figura 1. Preparación de la muestra de suelo para la prueba de corte directo. **a y b.** Procedimiento para obtener la muestra con el equipo metálico de muestreo; **c y d.** Protección lateral de la muestra con la caja de corte.

diferente para cada una de ellas, el cual se mantuvo constante durante el tiempo de la evaluación. Las fuerzas tangenciales que desplazaron el suelo se aplicaron con un gato mecánico, a una velocidad que osciló entre $0,25 \text{ mm.min}^{-1}$ y $0,44 \text{ mm.min}^{-1}$. Cada prueba finalizó cuando la caja alcanzaba un desplazamiento máximo de 4 cm (20% de deformación unitaria ($D.U.$)). Se tomó el valor final de $D.U.$ como criterio de falla de la muestra, en el caso dado que la curva de esfuerzos no presentara un pico definido, de tal forma que el valor de resistencia al cortante que alcanzara la muestra en el 20% de deformación unitaria, se tomaría como la resistencia pico o resistencia al cortante tangencial, de acuerdo con Márquez (11).

Índice de ocupación de raíces. Al finalizar cada prueba de corte, la muestra de suelo fue disecada cuidadosamente al aire y se recolectaron las raíces que atravesaban el plano de falla, con el fin de medir el área de

su sección transversal, para lo cual de cada raíz se midió su diámetro en los extremos superior e inferior, se calculó el promedio de estos dos valores y se determinó el diámetro promedio. Con dicho valor se calculó el área de la circunferencia para cada raíz. Este mismo procedimiento se hizo para todas las demás raíces y se calculó el índice de ocupación de ellas en el suelo, utilizando la relación propuesta por Waldron y Dakessian (26) y Gray y Sotir (6):

$$I.O = \frac{\sum A_r}{A_s} \quad \text{Ecuación <1>}$$

Donde:

$I.O$ es el índice de ocupación de raíces, adimensional; A_r es el área de circunferencia formada por la sección transversal de cada raíz presente en el plano de falla, en cm^2 ; A_s es el área del plano de falla, equivalente a 400 cm^2 .

Determinación de la resistencia al cortante tangencial del suelo. Con los datos de esfuerzos tangenciales y deformaciones unitarias se construyeron diagramas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria, en un sistema de coordenadas cartesianas, para cada prueba de corte hecha. El punto en el cual se equilibran las fuerzas que resisten y las que tratan de hacer fallar la muestra, corresponde a la resistencia al cortante tangencial del suelo, y se obtiene en el pico más alto alcanzado en el diagrama. Otro valor hallado fue el de la resistencia residual, la cual se determinó como el valor más bajo al que llegó el diagrama después de fallar el suelo por efecto del esfuerzo cortante tangencial.

Con el fin de comprobar el efecto de las raíces sobre la resistencia al cortante tangencial del suelo, se realizaron análisis de correlación lineal simple (r) entre el incremento dado por las raíces de cada especie a la resistencia al cortante y el área ocupada por ellas en el plano de falla o índice de ocupación de raíces ($I.O.$). Se tomaron 18 datos de resistencia al cortante registrados para cada una de las especies en todo el perfil, y se sometieron a análisis estadístico, utilizando la prueba de Bounferroni al 5% (12).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización dasométrica de las especies vegetales estudiadas

En la Tabla 1, se presentan las principales características dasométricas de las especies vegetales estudiadas, con alturas que oscilan entre 1,9 m (*Coffea arabica*) y 16,3 m (*Cordia alliodora*). El fuste con diámetro a la altura del pecho entre 0,08 m (*Coffea arabica*) y 0,45 m (*Cordia alliodora*). El diámetro de copa entre 1,1 m (*Coffea arabica*) y 12,4 m

(*Cordia alliodora*). Todas las especies estudiadas fueron mayores de 7 años de edad.

La vegetación arbórea y arbustiva permite que en el perfil del suelo se presenten sistemas radicales de anclaje mayor, en lo profundo y hacia los lados, aumentando su resistencia a la ruptura y con ello la estabilidad del terreno a los movimientos masales. Esto ha sido corroborado por trabajos de Flórez (5), reportados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en el área comprendida entre Manizales y Chinchiná, mediante seguimiento aerofotográfico y comprobaciones de campo, de zonas con sistemas agroforestales que pasaron a monocultivos, en suelos inestables, pedregosos, de pendientes fuertes y longitudes largas. Se comprobó que después de 2 a 6 años de transformado el sistema agroforestal, con eliminación de las especies forestales, en épocas lluviosas se presentaron ocho derrumbes por kilómetro cuadrado, debido a la pérdida de estabilidad de los suelos, como consecuencia de la suspensión del anclaje y amarre ejercido por los sistemas radicales de los árboles forestales, ya que al cortarlos se inicia un proceso de pudrición de las raíces.

En estudios de campo en laderas forestadas, O' Loughlin (1984) citado por Morgan y Rickson (13), indica que son las raíces más finas (1 – 20 mm de diámetro) las que contribuyen al refuerzo mecánico del suelo, y que las raíces más grandes juegan un papel no significativo. Las gramíneas, leguminosas y arbustos pueden tener un efecto de refuerzo a profundidades de 0,75 – 1,5 m. Los árboles tienen efectos a profundidades mayores y pueden mejorar la resistencia del suelo a profundidades de 3 m o más dependiendo de la morfología de las raíces. Los sistemas de raíces conducen a aumentar la resistencia en el suelo a través de un incremento en la

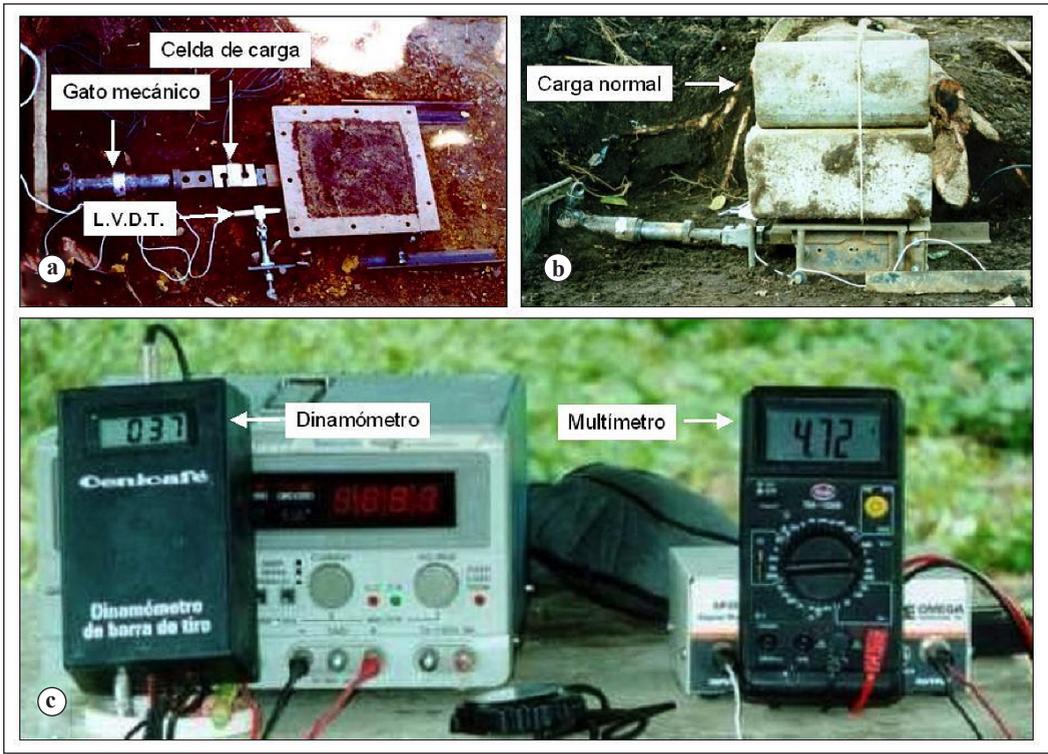


Figura 2. a. Montaje del equipo de corte; b. Aplicación de la carga normal para la consolidación de la muestra; c. Equipos electrónicos para la adquisición de datos.

Tabla 1. Promedio de las principales características dasométricas para las cuatro especies vegetales evaluadas.

Especie vegetal	Altura (m)	D.A.P. (cm)	Proyección copa (m)	Edad (años)
<i>Cordia alliodora</i>	16,3	44,9	12,4	> 20
<i>Trichanthera gigantea</i>	6,5	15,8	5,6	> 10
<i>Inga codonantha</i>	11,3	44,3	9,3	> 20
<i>Coffea arabica</i>	1,9	8,0	1,1	7

D.A.P.: Diámetro del fuste o tronco del árbol a la altura del pecho.

cohesión por el enlace de fibras de raíces con el suelo y la adhesión de las partículas del mismo a las raíces de las plantas.

Distribución del sistema radical de las especies estudiadas

En la Tabla 2 se presenta la distribución en longitud lateral y profundidad del sistema

radical de las especies estudiadas. Se observa que *Cordia alliodora* presenta las raíces laterales de mayor longitud promedio (11,7 m) y profundidad promedio de 2,8 m, seguida por *Inga codonantha* con longitud promedio de raíces laterales y profundidad de 5,5 m y 2,2 m, respectivamente. El café muestra los valores más bajos de raíces laterales (1,2 m) y de profundidad (0,60 m) (Tabla 2).

Tabla 2. Características del sistema radical de cuatro especies vegetales de la zona cafetera.

Especie	Promedio de la longitud de raíces laterales (m)	Promedio de la profundidad del sistema radical (m)	Promedio del peso por árbol (kg)
<i>Cordia alliodora</i>	11,7	2,8	250
<i>Inga codonantha</i>	5,5	2,2	
<i>Trichanthera gigantea</i>	5,0	1,6	
<i>Coffea arabica</i>	1,2	0,60	

En las Figuras 3, 4, 5 y 6, se presenta la distribución de los sistemas radicales de las especies vegetales estudiadas.

En el *Cordia alliodora* (Figuras 3 A y B), se encontró, un sistema radical compuesto por una raíz central bien definida (Figura 3 B) y una serie de raíces laterales primarias que se extienden hasta más allá de la proyección de la copa. Por lo tanto, no se puede afirmar que el diámetro de las raíces laterales, son iguales a la proyección de la copa del árbol.

La raíz central pivotante inicia con un diámetro aproximado de 0,15 – 0,16 m desde el cuello, conservando una forma cónica hasta llegar aproximadamente a 0,4 m de profundidad, donde se divide en cuatro o seis raíces con diámetros promedio entre 0,04 y 0,08 m, las cuales llegan hasta aproximadamente 2,20 m de profundidad en promedio.

A partir del eje del árbol se desprenden entre cinco o seis raíces laterales superficiales (Figura 3 A), cuyos promedios de diámetro en el cuello oscilan entre 0,1 m a 0,2 m, y se extienden lateralmente hasta longitudes de 8 m a 15 m, aproximadamente. De estas raíces laterales se desprende gran número de raíces secundarias, con diámetros entre 0,02 m y 0,06 m en el punto de inserción de éstas con la raíz lateral primaria, la cual se desplaza hacia el interior del suelo formando ángulos mayores de 60° respecto a la superficie del terreno y alcanza en la

mayoría de los casos profundidades mayores de 2 m en promedio. La mayor parte de estas raíces están confinadas en un radio aproximado de 1,20 m, medidos a partir del eje del árbol.

Con base en la longitud de las raíces laterales del nogal cafetero (11,7 m de radio, promedio) y el promedio del peso del árbol en conjunto (250 kg), se calculó la presión que ejerce el árbol sobre el terreno equivalente a $(250 \text{ kg}/\pi r^2 = 250\text{kg}/430,05 \text{ m}^2 = 0,58 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2})$. Este valor de presión (0,58 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) sobre el terreno, permite dilucidar las dudas acerca de que los árboles son demasiado pesados y por ello los causantes de los movimientos masales, lo que ha conducido a justificar la deforestación de las laderas colombianas, incrementándose los procesos de erosión y movimientos masales.

Inga codonantha. El sistema radical para guamo tuvo un comportamiento similar al de nogal cafetero en cuanto a su forma y distribución radical, debido a que se observa una raíz principal bien definida (Figura 4) y una serie de raíces laterales que se extienden por la superficie del suelo en forma radial a partir del eje principal.

La raíz principal de forma cónica llega a 0,6 ó 0,7 m de profundidad, donde se divide en tres raíces de 0,05 m a 0,055 m de diámetro en promedio, las cuales alcanzan profundidades mayores de 2,20 m. A partir de la base del tallo del árbol se desprenden

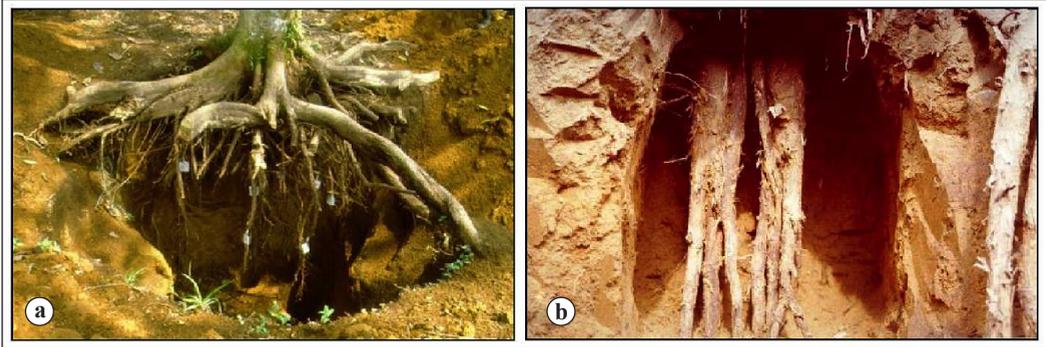


Figura 3. Distribución de raíces para nogal cafetero. **a.** Distribución de laterales y penetradoras; **b.** Raíz pivotante.

entre seis a siete raíces laterales de forma cilíndrica, con longitudes entre 3 m y 10 m. De estas raíces laterales se desprende una gran cantidad de raíces secundarias (penetradoras), con diámetros entre 0,23 m y 0,125 m y que se internan en el suelo con un ángulo casi recto hasta llegar a una profundidad promedio de 2 m. La mayor parte de estas raíces se distribuyen en un radio de 1,20 m medido a partir del eje del árbol.

Por la forma y desarrollo del sistema radical en las dos especies anteriores, las convierte en ideales para la prevención de movimientos masales, tanto superficiales de tipo translacional como rotacionales medianamente profundos, ya que la raíz pivotante y el conjunto de raíces secundarias de tipo penetrador, les permite comportarse como una columna que contrarresta las fuerzas cortantes que tratan de hacer deslizar la masa de suelo en zonas de ladera. Además, por tratarse de especies que en estado adulto alcanzan gran tamaño, el peso de la biomasa, distribuida en el área del sistema radical, convierte al sistema en una carga normal que mejora enormemente la cohesión del suelo, y por lo tanto se aumenta en gran medida la resistencia del suelo al cortante tangencial.

Trichanthera gigantea. Para el quiebrabarrigo no se observó raíz principal (Figuras 5

a y b), sino un gran conjunto de raíces laterales que se desprenden de la base del tallo, con diámetros entre 0,025 m y 0,080 m. Esto se debe a que la mayoría de las veces, estas especies se reproducen vegetativamente por estacas. Una proporción de estas raíces penetran dentro del suelo hasta alcanzar una profundidad cercana a los 1,60 m. A partir de estas raíces laterales se desprende un gran número de raíces secundarias, las cuales se extienden hacia los lados, alcanzando distancias entre 4 y 5 m (Figura 5 a). La mayor concentración de ellas se encuentra en la pared del perfil contraria al sentido de la pendiente, lo que permite prevenir en forma natural los movimientos en masa.

La gran densidad de raíces laterales, la facilidad de propagarse por vía vegetativa y la capacidad de desarrollarse en suelos degradados hacen que esta especie sea la ideal para prevenir deslizamientos, para recuperar suelos después de cualquier tipo de movimiento en masa.

Coffea arabica. El sistema radical de café se compone de una raíz principal bien definida con forma cónica (Figura 6 a), que inicia con un diámetro promedio aproximado de 0,020 m, hasta 0,40 m de profundidad, con un diámetro promedio



Figura 4. Distribución de raíces para guamo (*Inga codonantha*).

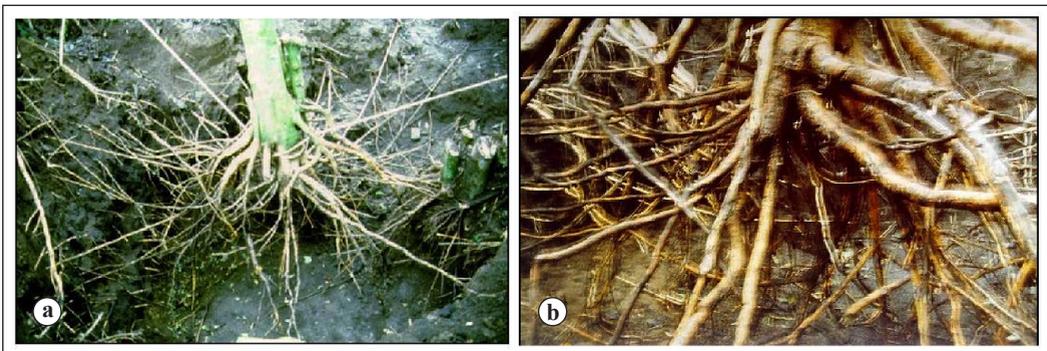


Figura 5. Distribución de raíces para quebrabarrigo (*Trichanthera gigantea*). **a.** Distribución de raíces laterales; **b.** no se observa raíz principal.

entre 0,005 - 0,007 m, el cual disminuye bruscamente para finalizar entre 0,60 m - 0,70 m de diámetro promedio.

Las raíces laterales localizadas en su mayoría en los primeros 0,20 m, se distribuyen en forma radial y se extienden hasta 1,20 m, iniciando con diámetros entre 0,005 m y 0,025 m desde el tronco, constituidas por gran cantidad de raicillas entre 0,0001 - 0,001 m de diámetro en promedio. La mayor parte del sistema radical de esta especie se

encuentra distribuido en los primeros 0,40 m del perfil del suelo (Figuras 6 B y C).

Esta especie por tener un sistema radical poco profundo y pese a contar con una gran cantidad de raíces de diámetros muy pequeños, no le permite comportarse de una manera ideal para el control de movimientos masales, tanto superficiales como profundos. Por lo tanto, es muy importante su establecimiento como cultivo bajo un sistema agroforestal (cuyo componente arbóreo podría ser el

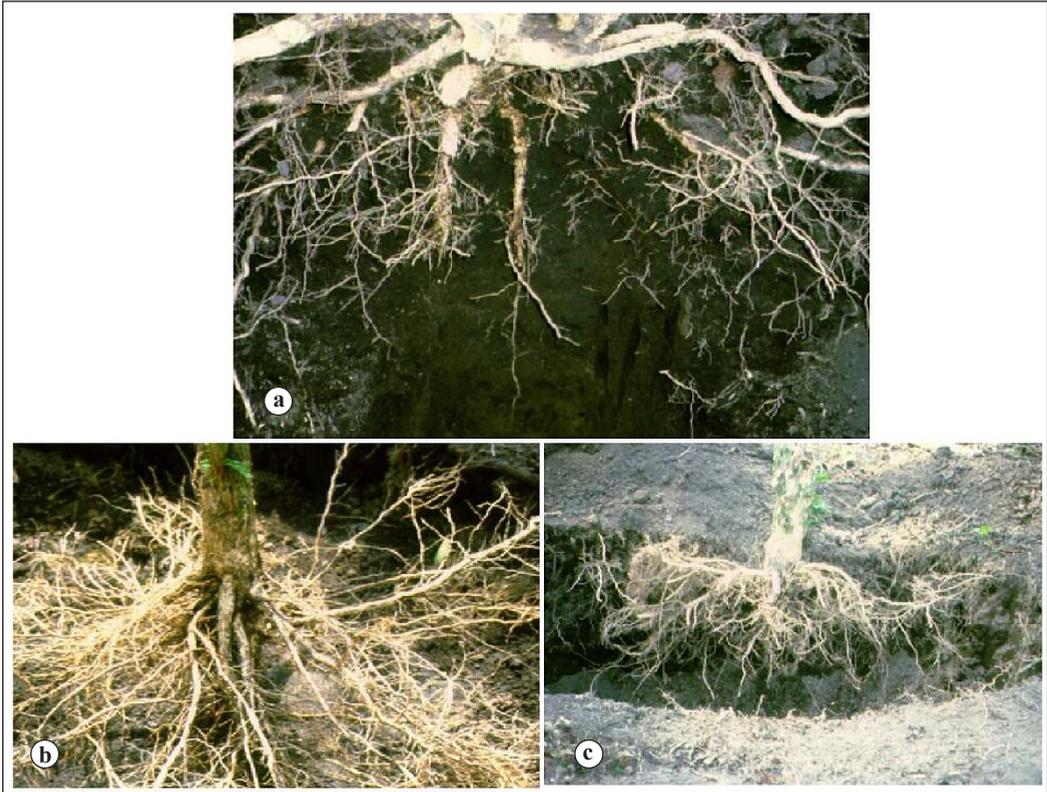


Figura 6. Distribución de raíces para el café (*Coffea arabica*). **a.** Raíz principal; **b.** y **c.** Distribución de raíces laterales.

guamo o el nogal cafetero), que prevenga movimientos masales en suelos de ladera altamente susceptibles a este tipo de procesos degradativos.

Influencia del sistema radical de las plantas en la resistencia del suelo al cortante tangencial

En la Figura 7, se presentan las curvas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria del suelo. En las pruebas de cortante tangencial efectuadas sobre el suelo libre de raíces se observa cómo la curva asciende rápidamente hasta llegar al punto de equilibrio, en el cual la resistencia al cortante tangencial es de 50,5 kPa. Una observación muy

importante es que la falla de la muestra ocurrió cuando la deformación unitaria fue del 2,2%. Seguidamente, la curva desciende en forma rápida hasta estabilizarse en un valor de resistencia residual de 20,1 kPa, el cual es inferior al valor de resistencia al cortante.

Para el caso de *C. alliodora*, las raíces de esta especie le permiten al suelo resistir esfuerzos cortantes de más de 100 kPa con solo 1,75% de deformación unitaria. A partir de este punto, el ascenso de la curva es más lento, hasta llegar al 20% de deformación unitaria, punto en el cual la muestra ha resistido la aplicación de esfuerzos tangenciales del orden de 115,2

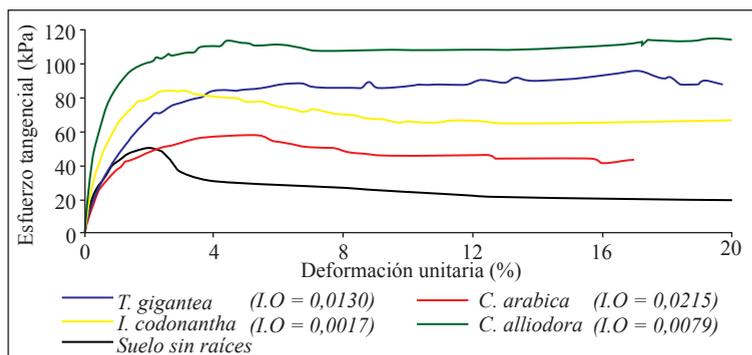


Figura 7. Curvas de esfuerzo tangencial contra deformación unitaria (*D.U.*) para suelos de la Unidad Chinchiná con y sin raíces de cuatro especies vegetales de la Zona Cafetera Colombiana.

kPa, pero sin que haya llegado al punto de equilibrio. En los otros casos la falla ocurre antes del 20% de deformación unitaria, pero la curva desciende lentamente alcanzando un valor de resistencia residual muy cercano al valor de la resistencia al cortante, como se observa en las curvas para las especies *I. codonantha*, *T. gigantea* y *C. arabica*, la resistencia al cortante tangencial fue de 84,83 kPa, 95,6 kPa y 57,8 kPa, respectivamente, y la resistencia residual fue de 66,6 kPa, 88,2kPa y 42,6 kPa, respectivamente.

Al comparar la curva para el suelo libre de raíces con las encontradas para las muestras de suelo con raíces, se observa que la tendencia en estos últimos casos es soportar esfuerzos cortantes mayores y deformaciones más grandes antes del suelo fallar por efecto del esfuerzo cortante tangencial. Otra característica de las muestras de suelo con raíces es que el descenso de la curva es más suave y que el valor de resistencia residual es más cercano al valor de la resistencia al cortante tangencial o resistencia última. Lo anterior implica que la presencia de raíces refuerza el suelo, aumentando su estabilidad en el caso en que actúen cargas cortantes más altas de las que podría soportar el suelo desprovisto de ellas. Esto es confirmado por Waldron (25), quien expone que las raíces de las plantas aumentan la resistencia a la ruptura del suelo, en forma directa por

reforzamiento mecánico e indirectamente por la extracción del agua del suelo por transpiración, haciendo que éste permanezca en condición de campo. El refuerzo mecánico se manifiesta en un aumento considerable en la componente cohesiva, debido al peso de la vegetación y a la interacción entre el suelo y las raíces (14).

La tendencia de las curvas encontradas es muy similar a las halladas por O'loughlin y Ziemer (14), Ekanayake *et al.* (4) y Hoyos y Mejía, (8), en cuyos trabajos se encontró que a medida que aumenta la densidad de raíces por unidad de área de suelo, la resistencia a esfuerzos cortantes es más alta y se alcanza en un desplazamiento mayor de la muestra.

En la Tabla 3 se muestran los valores promedio de resistencia al cortante tangencial (*R.C.*) del suelo con las raíces de cada una de las cuatro especies estudiadas, en las tres profundidades y el promedio de *R.C.* en todo el perfil.

A 0,20 m de profundidad (Tabla 3) el valor más alto para la resistencia al cortante tangencial se obtuvo en los sitios de muestreo con raíces de *C. alliodora* con 55,66 kPa, y los valores más bajos en suelo sin influencia de raíces (43,72 kPa) y en suelo con uso en café (44,19 kPa); estos resultados indican que en suelos susceptibles

Tabla 3. Resistencia promedio al cortante tangencial (*R.C.*) a tres profundidades, en suelos de la Unidad Chinchiná (*Acrudoxic melanudands*) con presencia de raíces de cuatro especies vegetales de la zona cafetera colombiana.

Especie	<i>R.C.</i> (kPa)		Incremento de <i>R.C.</i> (kPa)		Índice de ocupación (I.O)	
	Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)
0,20 m de profundidad						
<i>T. gigantea</i>	52,63	29,61	18,47	66,54	0,0052	101,23
<i>C. arabica</i>	36,37	29,48	2,21	125,00	0,0059	130,41
<i>C. alliodora</i>	55,66	11,85	21,50	55,07	0,0017	41,04
<i>I. codonantha</i>	40,29	28,33	6,13	87,21	0,0006	103,6
Suelo sin raíces	34,16	26,31	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80 m de profundidad						
<i>T. gigantea</i>	70,53	29,83	27,13	59,71	0,0058	71,17
<i>C. arabica</i>	44,38	21,82	0,98	126,67	0,00	0,00
<i>C. alliodora</i>	64,97	17,77	21,57	74,21	0,0015	40,67
<i>I. codonantha</i>	60,31	23,28	16,92	56,72	0,0015	45,45
Suelo sin raíces	43,40	23,21	0,00	0,00	0,00	0,00
1,20 m de profundidad						
<i>T. gigantea</i>	57,54	21,97	3,92	89,63	0,0024	96,77
<i>C. arabica</i>	51,81	16,99	-1,80	98,76	0,00	0,00
<i>C. alliodora</i>	76,00	27,81	22,39	106,6	0,0035	73,58
<i>I. codonantha</i>	76,33	22,98	22,72	91,44	0,0021	74,65
Suelo sin raíces	53,61	19,50	0,00	0,00	0,00	0,00
20-120 cm de profundidad						
<i>C. alliodora</i>	65,54a	24,44	21,82	77,28	0,0022	77,84
<i>T. gigantea</i>	60,23a	29,18	16,51	99,15	0,0045	92,41
<i>I. codonantha</i>	58,98a	24,44	15,26	77,28	0,0014	77,84
<i>C. arabica</i>	44,19b	26,41	0,46	89,79	0,0059	130,41
Suelo sin raíces	43,72b	28,25	0,00	0,00	0,00	0,00

Letras no comunes indican diferencias estadísticas, según prueba de Bunferroni ($P < 0,05$); C.V : Coeficiente de variación.

a los movimientos masales, caso de la Unidad Parnaso (*Typic eutropepts*), por su condición arcillosa y de baja permeabilidad, el cultivo de café como monocultivo no es garantía para estabilizar y prevenir los movimientos masales, sino que se deben usar y manejar los suelos con sistemas agroforestales. Según Rivera (20), al medir la permeabilidad en suelo de la Unidad Parnaso (*Typic eutropepts*) cultivado en café como monocultivo, encontró valores de permeabilidad, que van de 2,18 a 0,03 cm.h^{-1} para las profundidades de 0 a 10 y 40 a 60 cm, respectivamente. Estos contenidos son

clasificados como permeabilidad moderada, según O Neal (1949), citado por Lal (9) y Anaya *et al.* (1). Así como clasificación muy baja según O Neal (1949), citado por Lal (9), y muy lenta según Anaya *et al.* (1) para la profundidad de 40 a 60 cm. En la profundidad de 10 a 40 cm se presenta una permeabilidad de 0,05 a 0,03 cm.h^{-1} , respectivamente, la cual es clasificada como muy baja y muy lenta, según O Neal (1949), citado por Lal (9) y Anaya *et al.* (1), respectivamente. La discontinuidad en la permeabilidad dentro del perfil de estos suelos, es lo que origina desprendimientos

superficiales en épocas muy lluviosas, por saturación de los primeros 0 a 10 cm de profundidad del suelo, capa que reposa sobre horizontes menos permeables, que obran como planos de deslizamiento (Figura 8). Los desprendimientos de estas capas superficiales se deben principalmente a una disminución de la resistencia del suelo al cortante tangencial, por un incremento de la presión de poros al saturarse, disminución de la cohesión entre partículas del suelo y a una fricción menor entre ellas (11).

A 0,80 m de profundidad el promedio más alto de resistencia al cortante tangencial, se consiguió con las raíces de *T. gigantea* con 70,53 kPa y el valor promedio más bajo en suelos sin raíces (43,40 KPa). A 1,20 m la tendencia fue muy similar entre las especies *C. alliodora* e *I. codonantha* con valores de 76 kPa para cada una. A 0,80 m y 1,20 m de profundidad no se encontraron raíces de café, por lo que la resistencia de esta especie al cortante tangencial fue muy similar a la del suelo sin raíces.

Estadísticamente no hubo diferencias significativas para la resistencia al cortante tangencial entre las especies de porte arbóreo (*C. alliodora*, *T. gigantea* e *I. codonantha*), pero sí se observaron deferencias estadísticas entre estas tres especies y el grupo conformado por la especie *C. arabica* y el suelo libre de raíces. Tampoco se observaron diferencias entre el suelo con raíces de café y el suelo libre de raíces (Tabla 3).

Este resultado demuestra la importancia que tiene la vegetación arbórea en la estabilización de suelos de ladera contra los deslizamientos en épocas de invierno, principalmente en lo profundo de su perfil del suelo, ya que las raíces que se encuentran a profundidades mayores, así mismo refuerzan mecánicamente el terreno a esas profundidades, lo cual hace que haya un contacto mayor de fricción entre las partículas del suelo y la superficie externa de la raíz, dando lugar a que ante la aplicación de esfuerzos de cortante tangencial, la raíz transmita totalmente sus



Figura 8. Suelo de la unidad Parnaso (*Typic eutropepts*), con uso en monocultivo de café. Se observa un movimiento en masa superficial hasta donde llega el sistema radical superficial del cultivo, indicando la necesidad de establecer un sistema agroforestal, con árboles de sistema radical más profundo, como refuerzo mecánico para el amarre del suelo.

propiedades mecánicas de resistencia a esfuerzos de tensión, conformando lo que Styczen y Morgan (23) denominan matriz de alta resistencia al cortante tangencial. Esto indica que una de las razones por las cuales se han incrementado los deslizamientos en el país y gran parte del trópico, es por el cambio de uso del suelo, especialmente en las laderas, pasando de bosques naturales con alta capacidad de refuerzo mecánico al suelo a grandes profundidades, por pasturas con sistemas radicales muy superficiales (0,30 m), que ofrecen el refuerzo sólo en los primeros 30 cm del suelo, razón por la cual se desplaza el terreno con la pastura, dando lugar a movimientos en masa de tipo superficial. La tala completa de la vegetación arbórea para el establecimiento de pastos y cultivos genera una inestabilidad de las formaciones superficiales expresada por una gran cantidad de movimientos en masa. En pendientes fuertes parte de la estabilidad se debe al enraizamiento (Rice, (1977) citado por Florez (5)), tanto por el anclaje vertical como por el horizontal (Gray (1971) y Dyrnes (1967), citados por Florez (5)). Por consiguiente, cuando se remueve la vegetación se acelera la ocurrencia de deslizamientos, debido a que aumentan en un 60% las presiones intersticiales que disminuyen la resistencia a la ruptura del suelo (Swanston (1969), citado por Ziemer (28)).

Índice de ocupación de raíces. Se refiere al número de raíces por unidad de área de suelo, ya que si existe un número mayor de raíces en el plano de falla, éstas aumentarán el refuerzo mecánico del suelo, como se observa en las correlaciones de la Tabla 4, donde se encontró correlación directa entre el incremento del cortante tangencial (*R.C.*) y el índice de ocupación (*I.O.*), con niveles de significancia superiores al 90%, lo que indica que a mayor número de raíces en

el suelo, aumenta la *R.C.* de éste. Estos resultados son una herramienta muy valiosa para demostrar que en la conservación de suelos de ladera, los tratamientos de tipo biológico deben ser la primera opción. Por lo tanto, para la prevención y control de movimientos masales se recomiendan trabajos de bioingeniería, los cuales por el efecto positivo de la vegetación, han demostrado ser efectivos, económicos y de fácil ejecución, partiendo de un buen conocimiento de la relación causa-efecto de los procesos degradativos a la luz de las relaciones Roca-Suelo-Grado y Longitud de la pendiente-Clima-Vegetación-Animal-Infraestructura-Hombre (16, 17, 18, 19, 20, 21, 22). Petrone y Preti (15) realizaron estudios de bioingeniería mediante pruebas con diversas especies nativas en Río Blanco, Nicaragua. Entre las especies utilizadas se evaluaron *Gliricidia sepium* (madero negro) y *Tabebuia rosea* (roble macuelizo) las cuales mostraron ser las más adecuadas para la bioingeniería del suelo en laderas, mientras que *Erythrina fusca* (helequeme) mostró un comportamiento exitoso sólo en la protección de riberas de ríos y quebradas.

Cohesión y ángulo de fricción interna del suelo. En la Tabla 5 se observa para el suelo libre de raíces una cohesión de 21,39 kPa y un ángulo de fricción interna de 30°. En el terreno con árboles de café la cohesión es de 23,01 kPa, con un ángulo de fricción interna de 29,5°. En el lote de quiebrabarrigo se obtuvo una cohesión de 25,47 kPa y un ángulo de fricción interna de 30°. Estos resultados concuerdan con lo establecido por O'loughlin y Ziemer (14), quienes sostienen que las raíces de los árboles mejoran ampliamente la cohesión del suelo, pero no afectan considerablemente el ángulo de fricción interna, por ser éste un parámetro propio de la textura del suelo y no de las raíces.

Tabla 4. Coeficientes de correlación lineal simple entre el índice de ocupación (*I.O.*) y el incremento de la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial (*R.C.*) dado al suelo por las raíces de cuatro especies vegetales de la zona cafetera colombiana.

Profundidad (cm)	Relación entre <i>R.C.</i> y el <i>I.O.</i> de cada especie vegetal							
	<i>C. alliodora</i>		<i>T. gigantea</i>		<i>I. codonantha</i>		<i>C. arabica</i>	
	<i>r</i>	c.v	<i>r</i>	c.v	<i>r</i>	c.v	<i>r</i>	c.v
20	0,82*	34,8	0,92**	28,8	0,69**	36,8	0,85**	72,2
80	0,86*	41,2	0,80	40,0	0,96**	17,9	-	-
120	0,85*	62,6	0,87**	179,2	0,88*	48,7	-	-
20-120	0,69**	57,7	0,82**	58,2	0,92**	39,2	-	-

r: coeficiente de correlación lineal simple; c.v: coeficiente de variación; *($P < 0,05$): Significativo; **($P < 0,01$): altamente significativo.

Tabla 5. Cohesión y ángulo de fricción interna para suelos de la unidad Chinchiná, con raíces de cuatro especies vegetales de la zona cafetera colombiana.

Especie vegetal	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción interna (grados)	c.v.	R2
<i>Cordia alliodora</i>	56,22N.S	17	24,68	0,04NS
<i>Trichanthera gigantea</i>	25,47**	30	20,94	0,51**
<i>Inga codonantha</i>	36,51N.S	30	33,07	0,14NS
<i>Coffea arabica</i>	23,01**	29,5	21,44	0,37**
Suelo libre de raíces	21,39**	30	4,61	0,95**

** Indica que el modelo de predicción es altamente significativo ($P < 0,01$); *indica que el modelo de predicción es significativo ($P < 0,05$); N.S indica que el modelo de predicción no es significativo; c.v.: coeficiente de variación; R2: coeficiente de determinación.

Las regresiones efectuadas para los lotes de guamo y nogal cafetero no fueron significativas estadísticamente y tuvieron coeficientes de determinación (R^2) muy bajos, razón por la cual no se pudieron determinar con confiabilidad la cohesión y ángulo de fricción interna. Este comportamiento en las curvas de regresión para estas dos especies se debió posiblemente a la gran resistencia mecánica de sus raíces, por lo que para estas especies se debe emplear un mayor número de muestras con el fin de tener una curva ajustada y confiable.

Predicción de la resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial. La resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial solo fue explicada por los modelos desarrollados con la variable aleatoria índice de ocupación. En todos los casos, la

resistencia a esfuerzos de cortante tangencial tuvo un comportamiento de tipo cuadrático, con una proporcionalidad directa entre el índice de ocupación y la resistencia al cortante tangencial del suelo. A 0,2 m de profundidad la mejor ecuación de predicción la tuvo el nogal cafetero con un coeficiente de determinación de 0,97, seguido por quiebrabarrigo con un coeficiente de determinación de 0,83 (Figura 9) y café con un coeficiente de determinación de 0,75 (Figura 10).

De 0 a 1,2 m de profundidad la mejor ecuación de predicción se registró con el guamo, con un coeficiente de determinación de 0,71, seguido por nogal cafetero con un coeficiente de determinación de 0,63, y el quiebrabarrigo con un coeficiente de determinación de 0,52 (Figura 11).

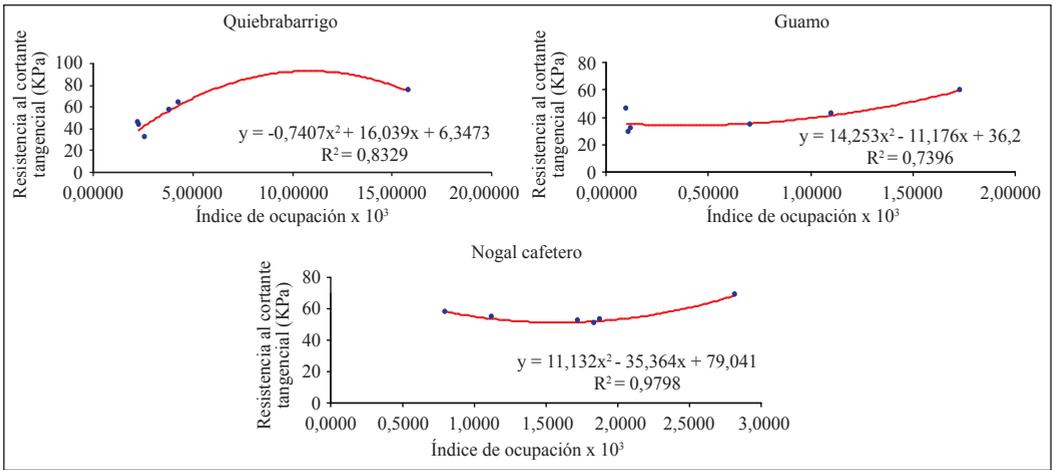


Figura 9. Efecto del grado de ocupación de las raíces de tres especies arbóreas (*Trichanthera gigantea*, *Cordia alliodora* e *Inga codonantha*) sobre la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial en suelos de la unidad Chinchiná, a 0,2 m de profundidad.

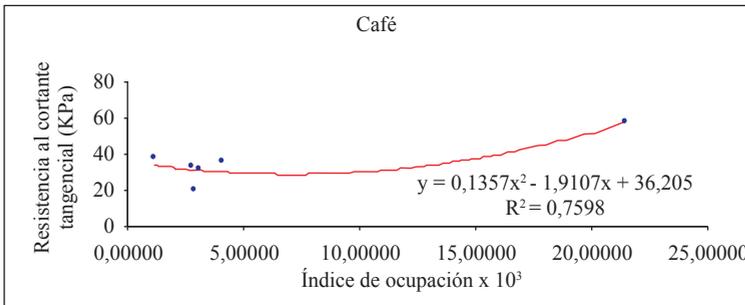


Figura 10. Efecto del grado de ocupación de las raíces de café sobre la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial en suelos de la unidad Chinchiná, a 0,2 m de profundidad.

Finalmente, puede concluirse que:

- Las raíces de los árboles y arbustos son elementos estructurales importantes en la estabilidad del suelo, principalmente por sus características físicas como su resistencia alta a la tensión cuando son sometidas a la acción de fuerzas de corte y tracción, y por sus características biológicas como su cantidad, tamaño y distribución dentro del suelo.
- Las especies nogal cafetero y guamo dieron al suelo una alta resistencia al cortante tangencial pico en todo el

perfil, a pesar de que el área ocupada por sus raíces en el plano de falla se consideró como la más baja respecto a las demás especies. Esto se debe a que estas raíces se comportan como materiales elásticos que al deformarse pueden soportar esfuerzos cortantes y de tracción más amplios que las raíces de las otras especies.

- En promedio, la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial hallada en el suelo con raíces de quiebrabarrigo de todo el perfil fue inferior a la hallada en nogal cafetero, y muy cercana

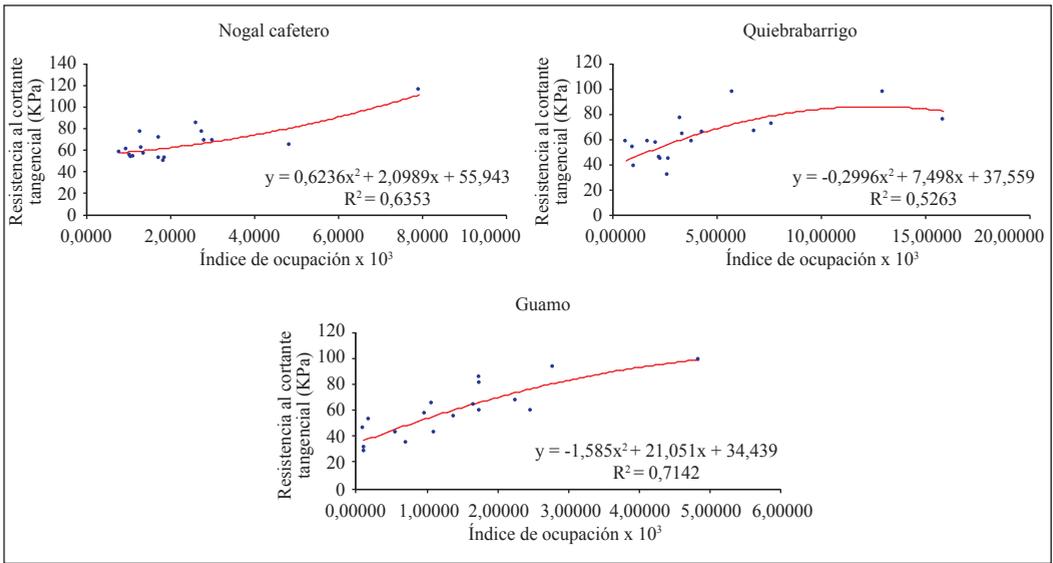


Figura 11. Efecto del grado de ocupación de las raíces de tres especies arbóreas (*Trichanthera gigantea*, *Cordia alliodora* e *Inga codonantha*) sobre la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial en suelos de la unidad Chinchiná, de 0 a 1,2 m de profundidad.

al valor encontrado para guamo, a pesar de tener mayor densidad de raíces atravesando el plano de falla. Esto indica que el efecto que esta especie tiene sobre la estabilidad del suelo se debe principalmente a la alta cantidad de raíces, más que a su resistencia individual a esfuerzos de corte y tracción, lo cual se observa claramente a 0,8 m de profundidad, donde la especie le dio al suelo la mayor resistencia a la cortante tangencial, y además tuvo el índice de ocupación promedio más alto de las tres profundidades de trabajo.

- Es un error considerar a los árboles ubicados en taludes y laderas como los causantes de los movimientos masales por su peso, ya que, con base en los resultados del presente trabajo queda demostrado que por el contrario son una solución económica, efectiva y además

preventiva debido a su refuerzo mecánico y a su capacidad evapotranspiradora, y a que su peso queda distribuido en toda el área del sistema radical, conduciendo a que la presión sobre el terreno, sea insignificante ($0,58 \text{ Kg.m}^{-2}$ en promedio aproximadamente).

- Los resultados encontrados en este trabajo son una herramienta valiosa para demostrar que en la conservación de suelos de ladera los tratamientos de tipo biológico deben ser la primera opción. Por lo tanto, para la prevención y control de movimientos masales se recomiendan los trabajos de bioingeniería, basados en la relación: Causa – Efecto, luego de un buen inventario a la luz de las relaciones: Roca-Suelo-Grado y Longitud de la Pendiente-Clima-Planta-Animal-Infraestructura-Hombre, los cuales han demostrado ser muy efectivos, económicos y de fácil ejecución.

AGRADECIMIENTOS

A la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia por su apoyo económico y logístico. A las Disciplinas de Suelos e Ingeniería Agrícola de Cenicafé. Al personal de la Estación Central Naranjal.

LITERATURA CITADA

1. ANAYA G., M.; MARTÍNEZ M., M.R.; TRUEBA C., A.; FIGUEROAS, B.; FERNÁNDEZ M., O. Manual de conservación de suelos y del agua. Chapingo : Colegio de postgraduados, 1977. 581 p.
2. COKER, I.; FLORES, R. A device for extracting large intact soil samples developed and used in a remote region of Bolivia. [En línea]. *Electronical journal of geotechnical engineering* Vol. 5. 2000. Disponible en internet: <http://www.ejge.com/2000/Ppr0003/Abs0003.htm>. Consultado en enero de 2001.
3. DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. USDA FOREST SERVICE. A soil bioengineering guide for streambank and lakeshore stabilization. [En línea]. Disponible en internet: <http://www.fs.fed.us/publications/soil-bio-guide/guide/chapter5.pdf> Consultado en Junio 1 de 2012.
4. EKANAYAKE, J.C.; MARDEN, M.; WATSON, A.; ROWAN, D. Tree roots and slope stability: A comparison between *Pinus radiata* and *kanuka*. *New zealand journal of forestry science* 27(2):216-233. 1997.
5. FLÓREZ, A. Geomorfología del área Manizales – Chinchiná, cordillera central, Colombia. *Ámsterdam : Universidad van Ámsterdam*, 1986. 159 p. Tesis doctoral.
6. GRAY, D.H.; SOTIR, R.B. Biotechnical and soil bioengineering: Slope stabilization, a practical guide for erosion control. New York : John Wiley and sons, 1996. 378 p.
7. HOLANDA, F.S.R.; GOMES, L.G.N.; ROCHA, I.P.J.DA; SANTOS, T.T.; ARAUJO, R.N. DE, FILHO; VIEIRA, T.R.S.; MESQUITA, J.B. Initial development of forest species on riparian vegetation recovery at riverbanks under soil bioengineering technique. [En línea]. Sao Cristovao : Universidade federal de Sergipe, 2010. Disponible en internet: <http://www.ufsm.br/cienciaflorestal>. Consultado en Junio 12 de 2012.
8. HOYOS, F.; MEJÍA, M. Las raíces de la estabilidad. *Boletín de vías Universidad Nacional de Colombia* 26(92):46-66. 1999.
9. LAL, R. Soil erosion in the Tropics: Principles and management. New York : MacGraw Hill, 1990. 580 p.
10. LAMMERANNER, W.; RAUCH, H.P.; LAAHA, G. Implementation and monitoring of soil bioengineering measures at a landslide in the middle mountains of Nepal. [En línea]. Vienna : Institute of soil bioengineering and landscape construction : University of natural resources and applied life sciences, 2004. Disponible en internet: <http://ovidsp.tx.ovid.com/sp-3.5.1a/ovidweb.cgi?&S=HAEFBFAAOMDDHCIDNICALNFGCGGCFAA00&Complete+Reference=S.sh.14|9|1>. Consultado en Junio 13 de 2012.
11. MÁRQUEZ, C.G. Propiedades ingenieriles de los suelos. Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 1984. 243 p.
12. MOLINERO, L.M. Análisis de subgrupos y de objetivos secundarios: el problema de las comparaciones múltiples, comparación de valores basales. [en línea]. Madrid : seh-lilha, 2002. <http://www.seh-lilha.org/subgrupos.htm>. Consultado en mayo 31 de 2012.
13. MORGAN, R.P.C.; RICKSON, R.J. Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach. London : E & FN Spon, 1995. 271 P.
14. O'LOUGHLIN, C.; ZIEMER, R.R. The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests. [En Línea]. P. 70-78. Oregon : Proceedings of i.u.f.r.o. workshop ecology of subalpine ecosystems, 1982. Disponible en internet: <http://www.rsl.psw.fs.fed.us>
15. PETRONE, A.; PRETI, F. Soil bioengineering for risk mitigation and environmental restoration in a humid tropical area. [En línea]. Florence : DEISTAF, 2010. Disponible en internet: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/239/2010/hess-14-239-2010.pdf>. Consultado en Junio 12 de 2012.
16. RIVERA P., J.H. Sistemas de drenaje con filtros vivos para la estabilización y restauración de movimientos masales en zonas de ladera. Chinchiná : Cenicafé, 2011. 12 p. (Avances Técnicos No. 413).
17. RIVERAP., J.H. Utilización del nacedero *Trichanthera gigantea* (H.& B.) Nees. para la prevención y recuperación de áreas degradadas por erosión y remociones masales en suelos de ladera colombiana. p. 54-62. En: Seminario taller tres especies vegetales

- promisorias para sistemas sostenibles de producción agropecuaria: Nacedero, Botón de oro *Tithonia diversifolia* y Bore *Alocasia macrorrhiza*. Cali : CIPAV, 2002.
18. RIVERA P., J.H. Manejo y estabilización de taludes en zonas de ladera mediante tratamientos de bioingeniería. Chinchiná : Cenicafé, 2001. 8 p. (Avances Técnicos No. 291).
 19. RIVERA P., J.H. Control de derrumbes y negativos en carreteras, mediante tratamientos de tipo biológico. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 8 p. (Avances Técnicos No. 264).
 20. RIVERA P., J.H. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera central colombiana. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. 525 p. Tesis: Philosophy doctor.
 21. RIVERA P., J.H. Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. Chinchiná : Cenicafé, 1998. 8 p. (Avances Técnicos No. 256).
 22. RIVERA P., J.H.; SINISTERRA R., J.A. Uso social de la bioingeniería para el control de la erosión severa. Cali : CIPAV, 2006. 110 p.
 23. STYCZEN, M.E.; MORGAN, R.P.C. Engineering properties of vegetation. p. 7-57. En: MORGAN, R.P.C.; RICKSON R.J. Slope stabilization and erosion control; A bioengineering approach. London : E. y F.N Spon, 1995.
 24. SUÁREZ, S.; ÁLVAREZ, O.J.; BALDIÓN, V. Estudio detallado de suelos y clima estación central Naranjal. Chinchiná : Cenicafé, 1994. 87 p.
 25. WALDRON, L.J. The shear resistance of root-permeated homogeneous y stratified soil. Soil science society of american journal 4:843-849. 1977.
 26. WALDRON, L.J.; DAKESSIAN, S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties. Soil science 132(6):427-435. 1981.
 27. WALDRON, L.J., DAKESSIAN, S.; NEMSON, J.A. Shear resistance enhancement of 1.22 meter diameter soil cross sections by pine y alfalfa roots. Soil science society of american journal 47:9-14. 1983.
 28. ZIEMER, R.R. The role of vegetation in the stability of rooted slopes. [En Línea]. Kyoto : International union of forestry research: World congress, 1981. Disponible en internet: <http://www.rsl.psw.fs.fed.us>. Consultado en Diciembre de 2000.