

# PROPIEDADES FÍSICAS DE UN ANDISOL DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA Y SU INFLUENCIA SOBRE LOS DESLIZAMIENTOS<sup>1</sup>

Jorge Enrique Barrera-Gutiérrez\*; José Horacio Rivera-Posada\*

## RESUMEN

**BARRERA G., J.E.; RIVERA P., J.H. Propiedades físicas de un andisol de la zona cafetera colombiana y su influencia sobre los deslizamientos. Revista Cenicafé 62(1):76-86.2011.**

Se realizó una investigación en la Estación Experimental Naranjal y en el laboratorio de física de suelos de Cenicafé, con el fin de estudiar la relación entre la resistencia a los deslizamientos y las propiedades físicas de un suelo clasificado como *Acrudoxic melanudands*. Se determinó la resistencia del suelo al cortante tangencial, para lo cual se efectuaron 18 pruebas de corte directo sobre monolitos de suelo consolidados, no drenados, a tres rangos de profundidad del perfil de suelo (20, 80 y 120 cm), y seis pruebas de corte para cada profundidad. El tamaño de cada monolito fue de 20 x 20 x 10 cm. Se aplicaron cargas normales de 6,0; 8,0; 11,0; 13,5; 16,5 y 19,0 kPa, para cada prueba de corte. En cada profundidad se determinaron propiedades físicas como granulometría, propiedades volumétricas, estabilidad de agregados, límites de consistencia y contenido de humedad. La resistencia al cortante tangencial aumentó directamente con la profundidad del perfil del suelo, el menor valor promedio se registró a los 20 cm (34,16 kPa) y el mayor valor (53,61 kPa) a 120 cm. Hubo una correlación lineal inversa y altamente significativa entre el contenido de arcilla y la resistencia del suelo al cortante ( $r=-0,94$  y  $r=-0,60$ ) a los 20 cm y de 20 a 120 cm, respectivamente, lo que indica que a mayor contenido de arcilla menor resistencia al cortante tangencial. Se observó una relación similar entre la resistencia al cortante tangencial y la humedad gravimétrica en la profundidad de 20 a 120 cm ( $r=-0,54$ ). Los valores de límite plástico y líquido mostraron relación inversa con la resistencia al cortante tangencial del suelo, al igual que los contenidos de arcilla.

**Palabras clave:** Suelo, movimiento masal, resistencia al cortante tangencial.

## ABSTRACT

This research was conducted in the Naranjal Experimental Station and in the Soils Physics Laboratory in order to study the relationship between resistance to landslides and the physical properties of a soil classified as *Acrudoxic Melanudands*. The resistance of soil to strength tangential shear was determined through 18 tests of directly cutting consolidated undrained soil monoliths, at three depth ranges of the soil profile (20, 80 and 120 cm) and six cutting tests for each depth. The size of each monolith was 20 x 20 x 10 cm. Normal loads of 6.0, 8.0, 11.0, 13.5, 16.5 and 19.0 kPa, for each cutting test were applied. Physical properties such as particle size, bulk properties, aggregate stability, consistency and moisture content limits were determined at each depth. The tangential shear strength increased directly with the depth of the soil profile, the lowest average value was recorded at 20 cm (34.16 kPa) and the highest value (53.61 kPa) at 120 cm. An inverse linear correlation was highly significant between the content of clay and soil shear strength ( $r = -0.94$  and  $r = -0.60$ ) at 20 cm and from 20 to 120 cm, respectively, indicating that the higher clay content the less tangential shear strength. A similar relationship was observed between the tangential shear strength and the gravimetric moisture depth from 20 to 120 cm ( $r = -0.54$ ). The values of plastic and liquid limit showed an inverse relation with the tangential shear strength of the soil, just like clay content.

**Keywords:** Soil, mass motion, tangential shear strength.

<sup>1</sup> Fragmento de tesis "Evaluación del sistema radical de cuatro especies vegetales en la estabilidad de laderas de la zona cafetera colombiana" presentada por el primer autor a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Bogotá (Colombia), 2003, para optar al título de Ingeniero Forestal.

\* Investigador Asociado (hasta el año 2003) e Investigador Científico II. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

Los movimientos en masa son procesos debidos a la fuerza de gravedad, pendiente y saturación de los suelos, por los cuales una parte del terreno se desplaza a una cota inferior de la original. Este tipo de procesos gravitatorios se relacionan con altas precipitaciones, de tal forma que las lluvias torrenciales son precursoras de los movimientos en masa, debido a que aumentan las fuerzas desestabilizadoras y reducen la resistencia del suelo a los deslizamientos (3, 14).

Los movimientos masales son controlados por el equilibrio entre los factores estabilizadores o condicionantes (fuerza de las raíces, cohesión, entre otras) y los factores desestabilizadores o desencadenantes (pendiente, fuerzas de infiltración y nivel freático, entre otras). Otra forma para explicar esta relación es la magnitud relativa de la resistencia al cortante frente al esfuerzo cortante (1).

La resistencia al cortante tangencial es un conjunto de parámetros fundamentales en el estudio de la mecánica del suelo, y su conocimiento es punto de partida para el entendimiento y tratamiento de los movimientos masales (13). La teoría de Charles Auguste de Coulomb, que data del año 1773, establece que un material falla, es decir, sufre rotura, deformación o movimiento, cuando el esfuerzo cortante aplicado en una dirección dada, supera a la resistencia natural del suelo al cortante tangencial en esa misma dirección, la cual depende de la cohesión y la fricción interna entre las partículas; lo anterior está dado por la ecuación de Coulomb, Ecuación <1>.

$$S = C' + \sigma' \tan \phi$$

Ecuación <1>

La Ecuación <2> se utiliza cuando en el suelo actúan esfuerzos negativos como la presión de poros, en suelos saturados ( $\mu$ ) (5, 13), característica frecuente en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. La cohesión,

la presión de poros y el ángulo de fricción interna, están altamente relacionados con las propiedades físicas del suelo, los cuales a su vez dependen en gran parte del material parental y de los procesos de formación del mismo (5). Los factores cohesión del suelo y presión de poros pueden ser modificados por el hombre, debido a las prácticas de uso, manejo y conservación de los suelos y aguas, al favorecer la mayor o menor cohesión y condiciones de drenaje al terreno. El ángulo de fricción interna depende principalmente de características propias de las partículas del suelo como son la textura, fricción mecánica directa y la trabazón existente entre éstas (5).

$$S = C' + (\sigma' - \mu) \tan \phi$$

Ecuación <2>

Donde:

S = Resistencia al cortante tangencial del suelo

C' = Cohesión del suelo

$\sigma'$  = Esfuerzo normal al plano de corte

$\phi$  = Coeficiente de fricción interna

$\mu$  = Presión de poros

Diversos autores reportan la relación entre la resistencia al cortante tangencial de los suelos y propiedades físicas y mecánicas diferentes de los mismos como el índice de plasticidad, tamaño medio de partículas, contenido de arcillas, grado de compactación, relación de espacio vacío y mineralogía de arcillas (4, 6, 7, 9, 10, 12). Dichas relaciones son importantes para entender los procesos por los cuales se originan los movimientos masales en la Zona Cafetera Colombiana y encontrar modelos sencillos para la predicción de la resistencia al cortante tangencial de los suelos y medidas preventivas y de control inmediatas.

El objetivo de la investigación fue estudiar la relación entre la resistencia al cortante

tangencial y las propiedades físicas de un suelo *Acrudoxic melanudands* de la zona cafetera colombiana, con el fin de contribuir al entendimiento de la ocurrencia de los movimientos masales en dicha región, prevenirlos o controlarlos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización, condiciones climáticas y de suelo.** El estudio se desarrolló en la Estación Central Naranjal, localizada en Chinchiná (Caldas), a 04°58' de latitud Norte y 75° 42' de longitud Oeste, a una altitud de 1.400 m, con valores anuales de lluvia de 2.800 mm, temperatura media 21,2°C y 76% de humedad relativa. El suelo sobre el cual se realizó el estudio correspondió a la Unidad Chinchiná, clasificado taxonómicamente como *Acrudoxic melanudands*, dicho suelo no se cultivaba por más de 15 años y presentaba una población diversa de arvenses propias de la zona al momento del estudio. Los análisis de laboratorio se realizaron en las instalaciones de Cenicafé (Manizales, Caldas), a 05°01' latitud Norte, 75° 36' longitud Oeste, a 1.310 m de altitud y temperatura media 20°C.

**Determinación de la resistencia del suelo al cortante tangencial.** En total se realizaron 18 pruebas de corte directo (*in-situ*) sobre monolitos de suelo consolidados, no drenados y bajo deformación controlada, a tres profundidades del perfil del suelo (20, 80 y 120 cm), y para cada profundidad se practicaron seis pruebas de corte. El tamaño de cada monolito de suelo fue de 20 x 20 cm de lado x 10 cm de altura.

Cada muestra fue aislada por medio de una lámina metálica de acero, que rodeaba la misma, y se consolidó por medio de esfuerzos normales, aplicando una carga por cada prueba de corte de: 6,0; 8,0; 11,0; 13,5; 16,5 y 19,0 kPa.

Por medio de un gato mecánico, a cada monolito se le aplicaron esfuerzos tangenciales sobre la lámina metálica, haciéndola desplazar a una velocidad de corte que varió entre 0,25 a 0,44 mm.min<sup>-1</sup>, hasta alcanzar un desplazamiento máximo de 4,0 cm (20% de deformación unitaria).

La resistencia al cortante tangencial del suelo se determinó como el valor más alto o resistencia pico, obtenido mediante un diagrama de esfuerzo tangencial (abscisa) y deformación unitaria (ordenada).

**Propiedades físicas del suelo.** Se tomó una muestra de suelo por cada prueba de corte (18 pruebas de corte), con el fin de realizar las siguientes determinaciones:

**Granulometría:** Se determinaron los porcentajes de arena (A), limo (L) y arcilla (Ar) por el método del hidrómetro propuesto por Bouyoucos, utilizando pirofosfato de sodio al 8% como dispersante.

**Densidad aparente (Da):** Se halló por el método del cilindro propuesto por Coile (1936), citado por Montenegro y Malagón (8).

**Densidad real (Dr):** Se obtuvo por el método del picnómetro, descrito por Montenegro y Malagón (8).

**Estabilidad estructural de los agregados:** Se utilizó la técnica de Yoder, descrita por Montenegro y Malagón (8), y se calcularon los siguientes índices: Diámetro ponderado medio (DPM), índice de estructura (IE) y estabilidad de la agregación (EA).

**Límites de Atterberg:** El límite líquido (LL) se determinó por medio del método de la cazuela de Casagrande; el límite plástico (LP) se obtuvo de acuerdo con lo establecido por Montenegro y Malagón (8); el índice de plasticidad (IP) se calculó como

la diferencia entre el contenido de humedad en el punto de máxima saturación (LL) y la humedad presente en el punto de mínima saturación (LP).

**Humedad gravimétrica ( $\theta_g$ ):** Se obtuvo de acuerdo con la metodología propuesta por Gavande (2).

**Relación entre la resistencia al cortante tangencial y las propiedades físicas.** Se realizó un análisis de correlación lineal simple y uno de regresión múltiple utilizando el método de selección stepwise, entre la resistencia al cortante tangencial y las propiedades físicas del suelo, por cada profundidad (20, 80 y 120 cm) y por el perfil de suelo en general (20 a 120 cm).

Se hicieron análisis de regresión simple, en los cuales la variable respuesta fue la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial, y la variable aleatoria estuvo dada por cada una de las propiedades físicas y el índice de ocupación, con el fin de encontrar a cada profundidad, una ecuación que permitiera predecir la resistencia a esfuerzos de cortante tangencial para el suelo con raíces, a partir de las propiedades físicas y del área de ocupación de las raíces en el interior del suelo. A cada modelo de regresión, se le hizo el respectivo análisis de varianza, mediante el paquete estadístico SAS.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resistencia al cortante tangencial de suelos derivados de cenizas volcánicas

Por lo general, los suelos derivados de cenizas volcánicas han sido considerados estables a los deslizamientos. No obstante, en el presente estudio la resistencia al cortante tangencial mostró el menor valor promedio a los 20 cm de profundidad (34,16 kPa) y

el mayor (53,61 kPa) a los 120 cm (Tabla 1), valores que en el área de la construcción indican que es necesario quitar o decapitar los horizontes del perfil del suelo con valores bajos, hasta encontrar el terreno más firme donde los valores son altos, para establecer las estructuras de construcción de obras de infraestructura pesada como puentes, planes de vivienda, edificios, llenos para construcciones, protección de estructuras, entre otros, este razonamiento estaría fundamentado. Sin embargo, se ha generalizado el uso de la ecuación para determinar el factor de seguridad de las laderas, especialmente, cuando se presentan problemas de erosión o movimientos en masa en los períodos invernales, de tal forma que según la norma internacional, cuando el factor de seguridad es igual o menor que uno, es un indicador de que el terreno es inestable y se requiere de su estabilización.

Por lo anterior, es conveniente analizar e interpretar independientemente cada uno de los parámetros que componen la ecuación de resistencia al cortante tangencial, con el fin de precisar cuál o cuáles de ellos están influyendo directamente en la susceptibilidad o resistencia de los suelos a los deslizamientos y fundamentar las soluciones más acertadas, ya sea de tipo preventivo o de control. Es importante resaltar que la ecuación en mención está integrada por cuatro parámetros físicos, los cuales no son suficientes para explicar toda la dinámica y complejidad que se presenta en los suelos de las laderas tropicales, que puedan conducir a su estabilidad o susceptibilidad permanente. Por lo tanto, no se puede esperar que solamente con el valor de resistencia al cortante tangencial, basado en parámetros físicos, desconociendo los parámetros químicos y biológicos, pueda darse solución al problema, sino que se hace necesario interpretar la ecuación en forma integral y relacionarla con el ecosistema directamente en el campo, para así determinar

qué parámetro o parámetros están influyendo positiva o negativamente en la estabilidad de la ladera, para hacer la intervención más precisa y lógica.

Existen dos parámetros dentro de la ecuación de resistencia al cortante tangencial, manipulables por el hombre y directamente relacionados con los movimientos masales, como son la cohesión y presión de poros. Este último parámetro se manifiesta en el terreno a través de agrietamientos, fracturamiento de estructuras rígidas, como pisos y paredes de viviendas, puentes, muros y pavimentos, entre otros. Es una de las principales causas de deslizamientos y que por su desconocimiento, se procede a la reubicación de familias afectadas, y además, es el agente principal de pérdidas de vidas humanas y todo tipo de infraestructura en épocas de invierno. Esto orienta en el sentido que en períodos lluviosos son preferibles las obras de drenaje para el abatimiento de la presión de poros, que las de contención en concreto, que por el contrario pueden limitar el flujo libre del agua, incrementar la presión de poros, y disminuir la cohesión del terreno favoreciendo los deslizamientos.

### **Propiedades físicas de los suelos relacionadas con el agua y los movimientos masales**

**Granulometría:** Es una propiedad intrínseca del suelo, es decir, no es modificable por el hombre y está muy relacionada, con el coeficiente de fricción interna en la ecuación de resistencia al cortante tangencial y con la retención de humedad del suelo, que a la vez se relaciona con el parámetro de presión de poros. A 20 cm de profundidad se alcanzaron los valores más altos de contenido de arcilla (12,5% valor máximo), y así mismo, los valores más bajos de resistencia al cortante tangencial (34,2 kPa) (Tabla 1). De igual forma, al analizar el contenido de arena dentro del perfil del suelo, se presentó el valor promedio más bajo a 20 cm de profundidad

(54,6%) y un valor de resistencia al cortante tangencial de 34,2 kPa, en relación con las profundidades de 70 a 80 cm y 110 a 120 cm, con valores bajos de contenidos de arcilla (4,5% y 5,6%, respectivamente), altos valores de arena (70,8 % y 70,35 %, respectivamente), y valores de resistencia al cortante tangencial de 43,4 y 53,6 kPa, respectivamente (Tabla 1). Estos resultados son confirmados por otros autores quienes aseguran que a medida en que aumentan los contenidos de arena dentro del perfil del suelo, ocurre una mayor fricción entre las partículas, y con ello una mayor resistencia al cortante tangencial y a los movimientos en masa (5, 13). La alta presencia de arcillas (12,5%) en los primeros centímetros del perfil (20 cm) indica la razón por la cual en suelos derivados de cenizas volcánicas se presentan deslizamientos superficiales en los períodos invernales, los cuales están relacionados con el contenido de arcilla, la mayor retención de humedad, el menor coeficiente de fricción a esa profundidad del suelo y el uso del mismo en monocultivos de pastos de sistemas radicales muy superficiales (0,20 – 0,30 m), los cuales ofrecen refuerzo mecánico muy superficial, dejando el resto del perfil del suelo suelto y expuesto a los deslizamientos, indicando la necesidad de establecer sistemas agroforestales y silvopastoriles, con raíces de anclajes mayores en el terreno en profundidad y lateralmente.

**Límites de Atterberg:** Se determinaron hasta los 20 cm de profundidad, ya que no se presentó plasticidad entre las profundidades de 70 a 80 cm y 110 a 120 cm, debido a los bajos contenidos de arcilla (Tabla 1), propiedad que depende directamente de la atracción dada por las cargas eléctricas derivadas de los minerales de arcilla (8). Para los 20 cm de profundidad, el índice de plasticidad fue de 8,96 en promedio, poco plástico según USDA (11) y Montenegro y Malagón (8).

**Tabla 1.** Resistencia al cortante tangencial y propiedades físicas promedio del suelo *Acrudoxic melanudands* estudiado a diferentes profundidades.

Profundidad (cm)	Rc (kPa)	Ar (%)	L (%)	A (%)	$\theta_g$ (%)	Da (g.cm <sup>-3</sup> )	Dr (g.cm <sup>-3</sup> )	Pt (%)	DMP (mm)	EA (%)	LL (%)	LP (%)	IP
10 a 20	34,16	12,48	32,94	54,58	62,0	0,85	2,26	0,62	3,13	96,98	48,21	39,25	8,96
70 a 80	43,40	4,50	24,70	70,80	55,0	0,95	2,48	0,62	3,22	98,78	0,00	0,00	NP
110 a 120	53,61	5,62	24,03	70,35	52,0	0,97	2,52	0,62	3,19	98,40	0,00	0,00	NP

**Rc:** resistencia al cortante tangencial; **Ar:** contenido de arcilla; **L:** contenido de limo; **A:** contenido de arena;  **$\theta_g$ :** humedad gravimétrica **Da:** densidad aparente; **Dr:** densidad real; **Pt:** porosidad total; **DPM:** diámetro ponderado medio; **EA:** estabilidad de la agregación; **LL:** límite líquido; **IP:** límite plástico; **I.P:** índice de plasticidad; **NP:** no plástico

A la profundidad de 20 cm, el límite plástico promedio fue de 39,25%, valor en el cual el suelo pasa del estado plástico a quebradizo o frágil, que según la clasificación de USDA (11) es considerado como alto y que se relaciona con la mayoría de los deslizamientos superficiales en estos suelos. El límite líquido promedio fue de 48%, indicando que a partir de dicho valor, a los 20 cm de profundidad la masa de suelo comienza a comportarse como un fluido, perdiendo rápidamente su plasticidad y propiciando los deslizamientos. Estos resultados confirman lo discutido en el aparte sobre granulometría. No obstante, estos primeros 20 cm son los más disturbados durante la siembra de los cultivos, lo que sumado a las desyerbas drásticas, generalizadas y reiteradas con azadón y herbicidas, inducen a dejar los suelos sin su bioestructura natural, con una superficie específica alta, que en los períodos lluviosos prolongados, conduce al aumento de la retención de humedad y a su saturación, aunado a la pérdida del refuerzo mecánico de las raíces de la vegetación herbácea y arbustiva, propiciando deslizamientos superficiales en forma de golpes de cuchara. En potreros, se presenta una situación similar cuando hay sobrepastoreo con formación de

terracetas o patas de vaca y remoción de la carpeta vegetal (calvas) por pisoteo excesivo del ganado.

Entre 70 a 80 cm y 110 a 120 cm de profundidad el suelo se clasificó como no plástico, debido a los bajos contenidos de arcilla (4,5 – 5,6 %, respectivamente) y contenidos altos de arenas (70,8 – 70,35%). Esta condición es ventajosa para estos suelos contra los movimientos masales, por poseer un coeficiente de fricción alto; sin embargo, éstos son muy susceptibles a la erosión, por la presencia alta de arenas, las cuales, por su cohesión baja son fácilmente desprendibles por el impacto de las gotas de lluvia y arrastradas por las aguas de escorrentía. Estas propiedades físicas, permiten hacer diferencias entre un proceso de erosión y un movimiento en masa, y así mismo, orientar el tipo de prácticas de prevención y control.

**Densidad aparente:** La densidad aparente aumentó a través del perfil del suelo, de 0,85 g.cm<sup>-3</sup> hasta 0,97 g.cm<sup>-3</sup>, debido al incremento de los contenidos de arena, la disminución de la actividad de los microorganismos y a la consolidación natural del suelo, por el aumento de la presión a medida que

se profundiza dentro del perfil, entre otras propiedades. Esta situación conduce a que en un período invernal prolongado, como los casos del fenómeno de La Niña, se presente una discontinuidad hidráulica dentro del perfil del suelo, debido a que todos los poros del mismo, en los primeros 20 cm, se llenan de agua (presión de poros) y los horizontes con mayor densidad aparente, donde el agua se mueve lentamente, se convierten en planos de deslizamiento haciendo que la capa superficial se desplace, ocasionando movimientos superficiales, iniciados con agrietamientos superficiales.

**Estabilidad de agregados:** El diámetro medio ponderado (DMP) presentó un valor superior a 3 mm de diámetro promedio, lo cual se refleja en los valores de estabilidad de la agregación (EA) superiores al 95%. De acuerdo con los criterios de Montenegro y Malagón (8), los agregados superiores a 3 mm de diámetro promedio son estables a la acción del agua, esto indica que los suelos derivados de cenizas volcánicas son estables en forma natural a los deslizamientos. En este sentido, es posible afirmar que los movimientos en masa en este tipo de materiales se deben más al mal uso y manejo de los suelos y de las aguas, que a su naturaleza intrínseca.

### Relación entre las propiedades físicas evaluadas y la resistencia al cortante tangencial

Se encontró relación entre la resistencia al cortante tangencial y algunas propiedades físicas del suelo en la profundidad de 20 cm y en el conjunto del perfil (20 a 120 cm), mientras que en la profundidad de 80 cm no se vio relación alguna, y a 120 cm éstas fueron escasas.

Se presentó una correlación lineal inversa y altamente significativa ( $P < 0,001$ ) entre el contenido de arcilla y la resistencia del suelo al cortante tangencial para las profundidades

20 cm ( $r = -0,94$  y  $R^2 = 0,88$ ) y 20 a 120 cm ( $r = -0,60$  y  $R^2 = 0,36$ ) (Tablas 2 y 3, respectivamente), lo cual indica que la mayor presencia de arcilla dentro del perfil del suelo favorece la menor resistencia del mismo al cortante tangencial, y disminuye la resistencia a los deslizamientos, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,89$  (Figura 1). Se observó una relación similar

**Tabla 2.** Coeficientes de correlación lineal simple ( $r$ ) y de determinación ( $R^2$ ) entre la resistencia al cortante tangencial ( $R_c$ ) y diferentes propiedades físicas promedio, de un *Acrudoxic melanudands*, a 20 cm de profundidad.

Factores variables	$R_c$	
	0 – 20 cm de profundidad	
	$r$	$R^2$
Ar	-0,94**	0,88
L	0,91**	0,83
LP	-0,87*	0,76

**Tabla 3.** Coeficientes de correlación lineal simple ( $r$ ) y de determinación  $R^2$  entre la resistencia al cortante tangencial ( $R_c$ ) y propiedades físicas promedio diferentes, de un *Acrudoxic melanudands*, de 20 cm a 120 cm de profundidad.

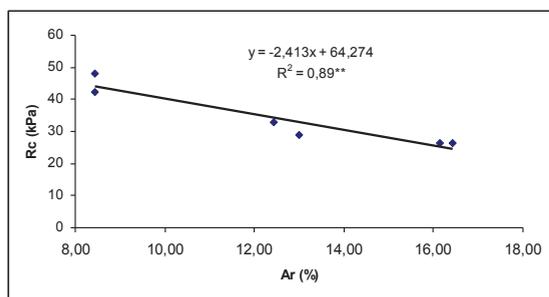
Factores variables	$R_c$	
	20 – 120 cm de profundidad	
	$r$	$R^2$
Ar	-0,60**	0,36
A	0,47*	0,22
$\theta_g$	-0,54**	0,29
Da	0,48*	0,23
Dr	0,50*	0,25
LL	-0,58**	0,34
LP	-0,58**	0,34
Dp	0,65**	0,42

entre la resistencia al cortante tangencial y la humedad gravimétrica entre 20 a 120 cm de profundidad ( $r = -0,54$  y  $R^2 = 0,29$ ) (Tabla 3), lo que define que a mayor contenido de humedad en el suelo menor es la resistencia de éste a los deslizamientos. El contenido de limo presentó correlación directa con la resistencia al cortante tangencial, con un coeficiente de determinación de 0,83 ( $p < 0,001$ ) (Tabla 2), mostrando como la alta presencia de limo en los suelos, favorece su resistencia a los deslizamientos, pero infiere alta susceptibilidad a la erosión. La relación directa entre el contenido de limo y la resistencia al cortante tangencial fue similar a la encontrada por Spivey *et al.* (12), en nueve suelos con bajos contenidos de materia orgánica.

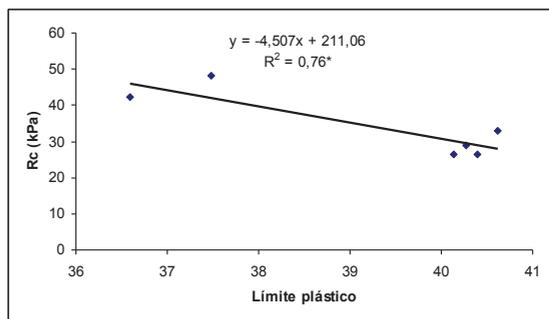
Lo anterior indica que contenidos altos de arcilla y humedad disminuyen la capacidad del suelo para soportar cargas o esfuerzos cortantes. La relación inversa registrada entre el contenido de arcilla y la resistencia al cortante tangencial como se muestra en la

Figura 1, concuerda con lo reportado por Rivera (9), quien determinó la resistencia al cortante tangencial hasta los 20 cm de profundidad, en cinco suelos de la zona cafetera colombiana, bajo tres usos, encontrando una relación similar entre la resistencia al cortante tangencial y el contenido de arcilla ( $r = -0,93$  y  $R^{2**} = 0,86$ , altamente significativo).

Los valores de límite plástico a la profundidad de 0 – 20 cm presentaron una correlación negativa y un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,76$  ( $p < 0,5$ ) (Tabla 2), lo cual indica que la presencia de agua en las laderas es uno de los principales agentes causantes de los deslizamientos. Situación similar se encontró a la profundidad de 20 – 120 cm, con los límites líquido y plástico, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,34$  ( $p < 0,001$ ) para ambos índices (Tabla 3). En la Figura 2, para la profundidad del suelo entre 10 – 20 cm, se observa una relación inversa entre la resistencia al cortante tangencial y el índice límite plástico, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,76$  ( $p < 0,05$ ), mostrando



**Figura 1.** Relación entre el porcentaje de arcillas (Ar) y la resistencia al cortante tangencial del suelo (RC) (20 cm de profundidad). \*\*Altamente significativo  $P < 0,001$



**Figura 2.** Regresión lineal simple entre el límite plástico y la resistencia al cortante tangencial del suelo (RC) (10 a 20 cm de profundidad). \* Significativo ( $Pr < 0,05$ ).

que a mayores cantidades de agua dentro del perfil del suelo mayor es su susceptibilidad a los deslizamientos. Según Suárez (13), entre más plástico sea el material mayor será su potencial de expansión y menor su resistencia al cortante tangencial (Figura 2), lo cual concuerda con los resultados del presente estudio, pues en las profundidades clasificadas como no plásticas (80 y 120 cm) la resistencia al cortante tangencial fue 27% y 57% superior a la obtenida en la profundidad de 20 cm, la cual presentó un grado leve de plasticidad. Lo anterior explica la baja ocurrencia de movimientos masales profundos en suelos de la unidad Chinchiná, *Acrudoxic melanudands*, comparado con otras unidades de suelo, con textura arcillosa.

Mediante análisis de regresión lineal múltiple, utilizando el método de selección stepwise (Tablas 4 y 5), se encontró que para las condiciones del estudio, la mejor estimación de la resistencia al cortante tangencial se puede lograr aplicando el modelo:

$$R_c = 477,8 - 7,356EA + 308,6Da,$$

Donde EA es la estabilidad de la agregación y Da la densidad aparente del suelo.

El modelo tiene en cuenta la estabilidad de la agregación (EA) y la densidad aparente (Da), propiedades que están relacionadas en forma directa o indirecta con la resistencia al cortante tangencial y otras propiedades físicas del suelo como la granulometría y el índice de plasticidad, entre otras. Estos modelos son importantes para la estimación de la resistencia al cortante tangencial del suelo, de una manera más rápida y económica, para lo cual y si se requiere hacer extrapolaciones, deben realizarse estudios similares en una mayor cantidad de suelos de la Zona Cafetera Colombiana, contrastantes en sus propiedades físicas y químicas.

**Tabla 4.** Resultados de la regresión lineal múltiple.

Estadísticas de la regresión	Valores
Coefficiente de determinación	0,73
Coefficiente de determinación ajustado	0,69
Coefficiente de variación	16,18
Observaciones	17
Pr>F	0,0001

**Tabla 5.** Coeficientes de regresión.

Parámetro	Coefficiente	Error estándar	Pr>  T
Intercepto ( $\beta_0$ )	477,8	118,6	0,0012
EA ( $\beta_1$ )	-7,356	1,548	0,0003
Da ( $\beta_2$ )	308,6	50,04	0,0000

En cuanto a la densidad aparente, los resultados concuerdan con lo reportado por Marshall *et al.* (6) y Seguel *et al.* (10) quienes encontraron que la resistencia al cortante tangencial usualmente tiende a incrementarse con el aumento de la densidad aparente. Por lo general, en suelos de cenizas volcánicas, dedicados a la agricultura, la densidad aparente del primer horizonte u horizonte orgánico, es baja con respecto a los horizontes más profundos, ya que es la zona donde se encuentran establecidos los cultivos y la mayor actividad de microorganismos y con ella, una alta porosidad del suelo. Es así como a medida que se profundiza dentro del perfil del suelo es mayor la densidad aparente, de ahí el incremento de la resistencia al cortante tangencial. Esto indica que la ecuación de resistencia al cortante tangencial está diseñada para la cimentación de estructuras pesadas de concreto.

Los primeros horizontes del suelo o en ocasiones toda la capa de cenizas volcánicas, al ser blandas y presentar densidad aparente y resistencia al cortante tangencial bajas, no indican, que el suelo sea inestable, sino que no posee la capacidad para soportar estructuras demasiado pesadas, ya que su resistencia a la compresión es muy baja, razón por la cual no se consideran importantes para cimentaciones pesadas, y por lo tanto, son decapitadas, para colocar las estructuras en el basamento sobre el cual se depositaron las cenizas.

Esto indica, que para la estabilización de laderas a los movimientos en masa en suelos de cenizas volcánicas, no debe utilizarse maquinaria pesada sobre la corona de los taludes, ya que con ella, puede colapsar el terreno y acelerarse los procesos de movimientos en masa, haciendo más costosa la solución o convirtiendo el problema en una situación crónica, que no es posible solucionar bajo dichas estrategias.

Lo más recomendable en el manejo de estos suelos es disturbar lo menos posible y hacer la estabilización preferiblemente en forma manual y con obras livianas de bioingeniería. Por lo regular, en forma generalizada, se está aplicando una ecuación generada para anclar estructuras pesadas, principalmente de concreto, sin importar la protección del agua y la biodiversidad. Al utilizar la ecuación de resistencia al cortante tangencial, no se tienen en cuenta otros parámetros alternativos integrales, que dan estabilidad natural al suelo a los movimientos en masa, tales como la materia orgánica que mejora la cohesión del suelo al obrar como un puente de unión entre cargas negativas y positivas para formar los agregados del mismo, aumentando la estabilidad del suelo a la erosión y a los deslizamientos. Así mismo, no se valora la influencia positiva en la cohesión del suelo ejercida por la presencia de materia orgánica,

los ácidos urónidos y poliurónidos, y sustancias gelatinosas producidas por hongos, bacterias y actinomicetos, la influencia de las hifas de los hongos como refuerzo mecánico junto con el sistema radical de la vegetación multistrata, entre otras, que intervienen en la resistencia de los suelos a los deslizamientos. Por lo tanto, la ecuación orienta pero no brinda la solución integral en problemas de erosión y movimientos en masa, ya que si se utiliza con esos criterios, a costos muy altos, se tendría que decapitar toda la capa orgánica y demás horizontes, hasta llegar al basamento que soporta las cenizas que los cubren, con pérdida de la biodiversidad de flora y fauna. Si no se efectúa una adecuada interpretación de la ecuación todas las vertientes de las tres cordilleras que atraviesan el país, se tendrían que cubrir de obras de concreto, lo que conduciría a perder el área útil para el desarrollo de los cultivos y la ganadería.

Lo anterior indica que antes de tomar una decisión para prevenir o controlar un problema de movimiento en masa, y en razón a que no todas las condiciones ecológicas son iguales, debe realizarse previamente un inventario y diagnóstico integral a la luz de las relaciones: Roca – Suelo – Topografía – Clima – Vegetación – Animal – Infraestructura – Hombre, que permita determinar la relación: Causa – Efecto del proceso degradativo. Esto permitirá interpretar dentro de la ecuación de resistencia al cortante tangencial qué parámetros están induciendo a la ruptura de la ladera o movimiento en masa, lo que conduciría a soluciones rápidas, eficaces, eficientes efectivas y económicas.

Puede concluirse que:

- Por lo general los suelos derivados de cenizas volcánicas, por sus propiedades físicas, químicas y biológicas, son estables a los movimientos en masa, aunque no tanto a la erosión, si se ha perdido la materia orgánica.

- Los resultados muestran que no es conveniente hacer generalizaciones en las obras para la prevención y estabilización de los suelos contra la erosión y los movimientos masales.

- No se debe generalizar el uso de la ecuación de resistencia al cortante tangencial sólo para el establecimiento de estructuras de concreto, en soluciones contra los deslizamientos, prescindiendo de los horizontes productivos del suelo.

- Antes de usar los resultados de la ecuación de resistencia al cortante tangencial, debe hacerse una interpretación previa de cada uno de sus parámetros para determinar cuáles de ellos están influyendo en el proceso degradativo, para atacarlo en forma eficiente, eficaz y económica.

- Para la estabilización de laderas a los movimientos masales en suelos de cenizas volcánicas, no se debe utilizar maquinaria pesada sobre la corona de los taludes, ya que con ella, pueden acelerarse los procesos de movimientos en masa, haciendo más costosa la solución o convirtiendo el problema en una situación crónica que no se soluciona bajo dichas estrategias.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a las Disciplinas de Suelos e Ingeniería Agrícola de Cenicafé, a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, a los doctores Miguel E. Cadena y Franco Humberto Obando, y al personal de la Estación Central Naranjal.

## LITERATURA CITADA

1. FAO. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas: diseño y construcción de caminos en cuencas hidrográficas frágiles. Guía FAO de conservación 13/5 Roma, 1990. 234 p.
2. GAVANDE, S.A. 1986. Física de suelos. Principios y aplicaciones. Mexico ed. Limusa, S.A. de C.V. 351 p.

3. GRAY, D. H. y SOTIR, R.B. 1996. Biotechnical and soil bioengineering: Slope Stabilization, A practical guide for erosion control. John Willey & Sons. 378 p.
4. KANDIAH, A. 1979. Influence of soil properties and crop cover on the erodibility of soil. In: Lal, R.; GREENLAND, D.J. Ed. Soil Physical properties and crop production in the tropics. Chichester (Inglaterra), John Willey & Sons. pp 475 – 487.
5. MÁRQUEZ, C. G. 1982. Propiedades ingenieriles de los suelos. Cuarta impresión. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín. 243 p.
6. MARSHALL T.J.; HOLMES J.W; ROSE C.W. 1996. Soil physics. 3th Ed., Cambridge University Press. 453 p.
7. MBAGWU, J.S.C.; ABEH, O.G. 1998. Prediction of engineering properties of tropical soils using intrinsic pedological parameters. Soil Science 163(2):93-102.
8. MONTENEGRO, G. H.; MALAGÓN, C. D. 1990. Propiedades físicas de los suelos. IGAC, subdirección agrológica. Bogotá. 813 p.
9. RIVERA P., J.H. 1999. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera central colombiana. Medellín (Colombia), Universidad Nacional. Facultad de Minas. 525 p. (Tesis: Philosophy Doctor).
10. SEGUEL S., O; ORELLANA S., I; ELLIES S., A. 2004. Propiedades físico-mecánicas dependientes de la génesis en suelos derivados de cenizas volcánicas. In: CONGRESO Latinoamericano, 16; Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 12. Cartagena (Colombia), Septiembre 26 - Octubre 1, 2004. Programa y memorias. Bogotá (Colombia), Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 6p.
11. SOIL SURVEY DIVISION STAFF. 1993. Soil survey manual. USDA Handbook No. 18, US Govt. Printing Office, Washington, DC. 437 p.
12. SPIVEY, L.D., Jr; BUSSCHER, W.J; CAMPBELL, R.B. 1986. The effect of texture on strength of Southeastern Coastal Plain soils. Soil Tillage Research 6:351-363.
13. SUÁREZ D., J. 1998. Deslizamientos y estabilización de laderas en zonas tropicales. Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). Bucaramanga. 548 p.
14. TRAGSA Y TRAGSATEC. 1994. Restauración hidrológico – forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid. 902 p.