

RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA AL CORTE DIRECTO Y PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN ALGUNOS SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA ¹

Sandra Bibiana Medina-López*, Luis Fernando Salazar-Gutiérrez**

RESUMEN

MEDINA L., S.B.; SALAZAR G., L.F. Relación entre la resistencia al corte directo y propiedades físicas y químicas en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. Cenicafé 60 (3):253-268. 2009

Para contribuir al conocimiento y la mitigación de los movimientos en masa en la zona cafetera colombiana, se estudió la relación entre la resistencia al corte directo y 22 propiedades físicas y 11 propiedades químicas de algunos suelos cafeteros en los departamentos de Caldas, Quindío y Tolima, en 11 unidades cartográficas de suelo. En el horizonte B de cada sitio se realizaron mediciones *in situ* de la resistencia al corte y penetrabilidad por los métodos de la veleta, Torvane y la resistencia a la penetración. Se tomaron muestras con mínimo disturbio para determinar la resistencia al corte directo en el laboratorio y muestras alteradas para evaluar las propiedades físicas y químicas. En suelos plásticos las propiedades que mostraron mayor relación con la resistencia al corte directo fueron aluminio ($r=0,52$), materia orgánica ($r=0,51$), pH ($r=-0,50$), índice de plasticidad ($r=-0,51$) y resistencia a la penetración ($r=0,44$). El método *in situ* que presentó mayor correlación con el método directo para la determinación de resistencia al corte en suelos plásticos fue la resistencia a la penetración ($r=0,44$), mientras en suelos sin plasticidad fue el método de la veleta ($r=0,55$).

Palabras clave: Movimientos en masa, conservación de suelos, propiedades mecánicas de los suelos.

ABSTRACT

In order to contribute with knowledge and mitigation of the mass movements in the Colombian coffee zone, the relation between direct shear and 22 physical properties and 11 chemical properties of some coffee soils in Caldas, Quindío and Tolima, in 11 cartographic soil units were studied. In horizon B of each site, measurements *in situ* of shear strength and penetrability by the vane, Torvane and resistance to penetration methods were carried out. Samples with minimum disturbance were taken to determine the direct shear strength in laboratory and disturbed samples were taken to evaluate physical and chemical properties. In plastic soils the properties that showed the closest relationship to direct shear strength were aluminum ($r = 0.52$), organic matter ($r = 0.51$), pH ($r = -0.50$), plasticity index ($r = -0.51$) and penetration resistance ($r = 0.44$). The *in situ* method that showed the highest correlation with the direct method to determine shear strength in plastic soils was resistance to penetration ($r=0.44$), while in soils without plasticity it was the vane method ($r = 0.55$).

Keywords: Slope movements, soil conservation, mechanical soil properties

¹ Fragmento de la tesis "Determinación de la relación entre la resistencia al corte y propiedades físicas y químicas en algunos suelos de la zona cafetera colombiana", presentada a la Universidad de Caldas para optar al título de Ingeniera Agrónoma.

* Ingeniera Agrónoma. Universidad de Caldas.

** Asistente de Investigación. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé. Chinchiná. Caldas, Colombia.

La erosión acelerada de los suelos y los deslizamientos son problemas ambientales de gran importancia en las zonas de ladera; estos últimos, desplazamientos de masas de suelo o roca por exceso de agua en el terreno y por efecto de la fuerza de gravedad (18), son problemas recurrentes en Colombia, donde se estima que el 16% del área está afectada por dicho proceso (21), lo que causa altas pérdidas económicas difíciles de cuantificar.

Los suelos de la zona cafetera colombiana son de reciente formación; en términos generales, corresponden a los ordenes entisol, inceptisol y andisol, heterogéneos en sus propiedades físicas y químicas, con pendientes de longitudes largas y de inclinación muy fuerte (19), que sumado a la alta intensidad y frecuencia de las lluvias la convierten en una región susceptible a los movimientos en masa (14).

La teoría de Charles Auguste de Coulomb, propuesta en 1773, establece que un material falla cuando el esfuerzo cortante en una dirección iguala la resistencia al corte en la misma dirección, lo cual depende de la cohesión y la fricción interna entre las partículas, y está dada por la Ecuación <<1>>, de Mohr-Coulomb (1, 9, 34).

$$S = C + \sigma \tan \phi \quad \text{<<1>>}$$

Donde:

S: Resistencia del suelo al corte

C: Cohesión del suelo

σ : Esfuerzo normal

ϕ : Ángulo de fricción interna

El esfuerzo cortante supera la resistencia al corte debido a sismos, aumento de la presión hidrostática, remoción del soporte o sobrecargas, o al disminuir la resistencia al corte por incremento de la presión intersticial,

meteorización y procesos de hinchamiento, entre otros (1, 9).

Son escasos los estudios sobre los parámetros de resistencia al corte de los suelos de la zona cafetera colombiana. Sin embargo, se encuentran algunos reportes sobre las propiedades de suelos como la Unidad Chinchiná (*Melanudands*) y su aplicación en la ingeniería para la zona cafetera de Caldas (22), los cuales muestran que debido al predominio de arenas son muy susceptibles a los movimientos en masa cuando superan el grado de pendiente en más del 50%, por la poca cohesión de estos materiales.

Algunos autores, como Aguilar y Mendoza (2), para las condiciones de ladera de la zona cafetera colombiana, han realizado estimaciones de susceptibilidad de los suelos a los movimientos en masa, que tienen en cuenta factores como la topografía, la geología y las lluvias, entre otros, pero con escasa información sobre las propiedades del suelo o su resistencia al corte directo, lo cual puede sobrestimar o subestimar las zonas susceptibles a dicho fenómeno.

La resistencia al corte está determinada por propiedades de los materiales como la cohesión y su coeficiente de fricción interna, las cuales dependen directamente de propiedades físicas, químicas y mecánicas, como la distribución de partículas, propiedades hidrológicas, volumétricas, plasticidad, estructura, contenido de elementos, contenido de materia orgánica y pH (1).

Al respecto, se reporta la relación inversa entre la resistencia al corte y las propiedades químicas como el pH (35, 27); de igual manera, Davies (10) encontró que a medida que aumentan los contenidos de materia orgánica, la resistencia al corte es mayor. Terlien (36) en un estudio de zonificación de amenazas por deslizamientos realizado en

Manizales (Caldas), reportó que los suelos orgánicos presentan mayor cohesión que otros suelos, aun en condiciones saturadas.

Diversas investigaciones, han encontrado relación de la resistencia al corte con propiedades físicas; Omar *et al.* (27), reportan que a medida que la saturación aumenta la resistencia al corte disminuye. Yilmaz (40) encontró una relación inversa entre la resistencia al corte y el índice líquido. De igual manera, Suzuki *et al.* (35) concluyeron que el límite líquido y el índice de plasticidad son las propiedades mecánicas relacionadas con la resistencia al corte en suelos con altos contenidos de esmectita.

El objetivo de esta investigación fue determinar la relación de la resistencia al corte directo con las propiedades físicas y químicas de algunos suelos de la zona cafetera colombiana, y contribuir al conocimiento de los factores de los movimientos en masa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en 33 sitios cultivados con café a libre exposición solar, pertenecientes a 11 unidades cartográficas de suelo, con materiales parentales contrastantes (ígneos, metamórficos, sedimentarios y cenizas volcánicas); para cada unidad se tomaron tres muestras. Los lotes tuvieron pendientes mayores al 65% y estuvieron ubicados en los departamentos de Caldas, Tolima y Quindío (Tabla 1).

En cada lote seleccionado se tomaron las muestras en el punto medio de la ladera, al tener como referencia la longitud de la misma. En el horizonte B de cada sitio o máximo a los 1,50 m de profundidad, por medio de un perfil de suelo (calicata) de aproximadamente 1 m de ancho, se realizaron mediciones *in situ* de la resistencia al corte

por los métodos de la veleta y Torvane, y se midió la resistencia a la penetración de cono, se tomaron muestras en sitios sin incidencia de raíces, con el menor disturbio con el tubo Shelby de 0,22 cm de largo y 0,635 m de diámetro, para determinar la resistencia al corte directo en el laboratorio, y muestras alteradas para la determinación de las propiedades físicas y químicas. La resistencia al corte se determinó por el método de corte directo consolidado drenado (CD).

Las pruebas de corte directo se realizaron en los laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, por medio del instrumento de corte directo Shear Tester T206 electronic, a una velocidad de 0,13 mm.min⁻¹. Para permitir el drenaje del agua y evitar la generación de cargas neutrales, se usaron tres cargas normales de 15, 30 y 60 kgf. Mediante un ajuste de regresión lineal se determinó la recta de Mohr y Coulomb, donde en el eje de las abscisas se representaban los valores de esfuerzo normal aplicados y en el eje de las ordenadas se representaban los valores de esfuerzos cortantes máximos hallados, la interceptación de la recta de regresión con el eje de las ordenadas se tomó como la cohesión (C) y el ángulo de inclinación de dicha recta como el ángulo de fricción interna (ϕ).

Las determinaciones físicas y químicas se realizaron en los laboratorios de la Disciplina de Suelos de Cenicafé, éstas fueron:

- Ángulo de fricción: Calculado a partir del criterio de falla de Mohr y Coulomb. Método de corte directo consolidado drenado. Se utilizó el instrumento de corte directo Shear Tester T206 electronic.
- Cohesión: Calculado a partir del criterio de falla de Mohr y Coulomb. Método de corte directo consolidado drenado.

Tabla 1. Localización de los muestreos según unidad de suelo.

Unidad cartográfica* (clasificación taxonómica de los suelos)	Material de origen	Sitios de muestreo				Profundidad de muestreo (m)
		Municipio (Departamento)	Vereda	Finca		
Chinchiná (<i>Acrudoxic Melanudands</i>)	Ceniza volcánica	Chinchiná (Caldas)	La Quiebra	Estación Central Naranjal	1,50	
			La Quiebra	Estación Central Naranjal	1,50	
			La Quiebra	Estación Central Naranjal	1,50	
Montenegro (<i>Typic Fulvudands</i>)	Ceniza volcánica	Buenavista (Quindío)	Río Verde	Subestación Paraguaitico	1,32	
			Río Verde	Subestación Paraguaitico	1,50	
			Los Sauces	San Alberto	1,50	
Fresno (<i>Melanudands</i>)	Ceniza volcánica	Fresno (Tolima)	Los Guaduales (campeón)	San Luis	1,50	
			El Guadual	El Edén	1,50	
			Mireya	San Martín	1,34	
			Bajo Español	La Playita	0,57	
200 (<i>Typic Eutropepts</i>)	Ígnea extrusiva (Basalto augítico)	Chinchiná (Caldas)	Bajo Español	La Veranera	0,66	
			Bajo Español	La Esperanza	0,15	
			Bajo Español			
Manila (<i>Typic Eutropepts</i>)	Ígneo intermedio (Pórfidos andesíticos)	Palestina (Caldas)	La Inquisición	Hacienda Manila	1,50	
			La Inquisición	Hacienda Manila	1,50	

Continúa...

... Continuación

Unidad cartográfica* (clasificación taxonómica de los suelos)	Material de origen	Sitios de muestreo			
		Municipio (Departamento)	Vereda	Finca	Profundidad de muestreo (m)
Sincerin (<i>Typic Entropepts</i>)	Ígnea extrusiva (Andesita feldespática)	Manizales (Caldas)	La Inquisición	Hacienda Manila	0,50
			El Rosario	Hacienda Venecia	0,86
			El Rosario	Hacienda Venecia	0,12
			El Rosario	Cuanto tengo	1,64
Cascarero (<i>Typic Entropepts</i>)	Metamórfico (Esquistito actinolítico)	Manizales (Caldas)	La Siria	La Palma	0,50
			Cueva Santa	El Paraíso	0,11
			Patio Bonito	Agrovilla-Las Aguas	0,30
Tablazo (<i>Typic Entropepts</i>)	Metamórfico (Esquistito talcoso)	Manizales (Caldas)	Guacas	La Carolina	0,85
			La Siria	EL Everest	0,60
			Bajo Tablazo	EL Zafiro	0,82
Chuscal (<i>Typic Entropepts</i>)	Metamórfico (Roca anfíbolita)	Manizales (Caldas)	Vereda Hoyo	Planalto	1,50
			Frío	Chuscal	1,00
			Bajo Chuscas	Planalto	0,10
			Vereda Hoyo		
			Frío		
Violeta (<i>Typic Entropepts</i>)	Metamórfico (Gneis biotítico)	Manizales (Caldas)	Alto del Zarzo	La Camelia	0,25
			Alto del Zarzo	San Martín	1,26
			Alto del Zarzo	La Camelia	1,00
Guamal (<i>Typic Entropepts</i>)	Roca sedimentaria (Arenisca olivínica)	Supía (Caldas)	Bajo Cabuyal	Rafael Escobar	0,80
			Taborda	5 y 6	0,92
			Taborda	Los Naranjos	0,12

* Según FNC (11, 12, 13).

Instrumento de corte directo Shear Tester T206 electronic.

- Granulometría y distribución de arenas por tamaño: Método de la pipeta (dispersión con pirofosfato de sodio al 8%) adaptado de Gee y Bauder (17).
- Límites de Atterberg: Límite plástico, límite líquido e índice de plasticidad, de acuerdo a la norma ASTM D4318-84 citada por USDA (37), Abramson *et al.* (1), y Das (9).
- Densidad aparente: Método del cilindro (5).
- Densidad de partícula o densidad real: Método del picnómetro ASTM, 1958, descrito por Blake y Hartge (6).
- Porosidad total: Calculado a partir de la densidad real y aparente (8).
- Humedad gravimétrica: Determinada por el método de secado en estufa (15).
- Resistencia al corte por el método Torvane *in situ* (Torvane marca Durham geo): Método citado por Das (9).
- Resistencia a la penetración de cono *in situ*. Se determinó por medio de un penetrómetro de impacto reportado por Stolf *et al.* (33), y Herrick y Jones (20). Las especificaciones del penetrómetro fueron: 2,1 kg de peso del mazo, 50 cm altura de caída del mazo, 2,2 kg de peso del penetrómetro sin el mazo, 1,82 cm² de sección máxima del cono.
- Resistencia al corte por el método *in situ* de la veleta, de 6,85 cm de diámetro y 13,90 cm de altura. Según el procedimiento ASTM D2573-78 descrito por Das (9).

- Retención de humedad del suelo: Método de platos porosos y cámaras de presión a 0,33- 0,1-0,5-1,0 y 1,5 MPa (23).
- Humedad disponible: Estimado a partir de la diferencia entre retención de humedad a 1,5 MPa y 0,033 MPa (37).
- Conductividad hidráulica: Método de carga constante en muestras saturadas (24).
- Coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) (37).
- Actividad de las arcillas: Índice de plasticidad/ porcentaje de arcilla (9).
- Estabilidad de agregados en húmedo: Método de Yoder (41), diámetro ponderado medio (DPM) y estabilidad de la agregación.

Los métodos químicos correspondieron a los procedimientos de rutina empleados en el laboratorio de Suelos de Cenicafé, los cuales son descritos detalladamente por Carrillo (7), como: Contenido de Materia Orgánica por el método de Walkley y Black (39), capacidad de intercambio catiónico, pH, potasio, calcio, magnesio, sodio, manganeso, hierro, aluminio (37) y azufre (fosfato de calcio 0,008 M – turbidimetría).

La investigación fue de tipo exploratorio y correlacional, el diseño fue no-experimental tipo transeccional (26). Se realizó el análisis descriptivo de las variables y se establecieron las relaciones entre la variable endógena (resistencia al corte directo) y cada una de las variables exógenas (propiedades físicas y químicas). A través de correlación lineal simple, se verificó la significación de este coeficiente según el estadístico de la prueba de correlación.

Se analizaron de manera separada los suelos plásticos y los suelos sin plasticidad. Los primeros fueron aquellos a los cuales fue posible determinar el límite líquido y el límite plástico, debido a los contenidos de arcilla y/o contenidos de materia orgánica. Los suelos en los que predominaban fracciones gruesas y en los que no fue posible hacer las determinaciones de los límites de Atterberg, se incluyeron en el grupo de los suelos sin plasticidad. Los suelos plásticos se clasificaron según el método de la carta de plasticidad de Casagrande citada por Abramson *et al.* (1) y Das (9).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resistencia al corte directo y parámetros de cohesión y ángulo de fricción. Sus valores promedio y coeficientes de variación se presentan en la Tabla 2. Los valores más altos de resistencia al corte, se presentaron en suelos con equilibrio entre sus parámetros

de resistencia (valores más altos de cohesión y fricción). Se observó un desequilibrio de éstos, en la Unidad Chinchiná, con el valor más alto de ángulo de fricción (31°) pero el más bajo de cohesión (10,8 kPa), mientras que las unidades Guamal y Tablazo tuvieron los valores más altos de cohesión (54,2 kPa y 51,3 kPa, respectivamente), debidos a su fracción fina o arcillosa, y sus valores de fricción fueron de 21° y 24°, respectivamente.

Granulometría. En la Tabla 3 se presentan los promedios y coeficientes de variación para la distribución de tamaño de partículas, en cada una de las unidades de suelo. Sobresalen los valores de arenas en los suelos derivados de cenizas volcánicas. La unidad Chinchiná presentó valores de arenas de 76,8% y los valores más bajos de limos (14,0%) y arcillas (9,2%), de allí, los bajos valores de cohesión. En contraste, la unidad Guamal presentó valores de arenas de 15,8% y contenidos de limos de 53,3% y arcillas

Tabla 2. Promedios y coeficientes de variación de la resistencia al corte directo y sus parámetros (c y ϕ) para cada una de las unidades evaluadas.

Unidad de suelo	Resistencia al corte directo (kPa)		Cohesión (c) (kPa)		Ángulo de fricción (ϕ) (grados)	
	\bar{X}	C.V. (%)	\bar{X}	C.V. (%)	\bar{X}	C.V. (%)
Chinchiná	128,9	4,5	10,8	92,3	31	8,5
Montenegro	104,9	6,9	38,3	38,7	19	27,5
Fresno	114,6	37,9	49,4	110,5	18	22,0
Doscientos	153,2	23,3	30,1	90,3	31	39,1
Manila	141,2	16,0	35,3	55,8	28	8,9
Sincerín	135,4	5,9	48,1	2,0	24	7,2
Cascarero	141,8	6,3	29,1	87,0	30	19,2
Tablazo	119,1	7,5	51,3	14,6	19	19,0
Chuscal	112,6	20,4	32,0	30,7	22	14,4
Violeta	125,0	20,3	34,3	73,2	25	20,8
Guamal	131,9	31,8	54,3	23,6	21	53,0

Tabla 3. Promedios y coeficientes de variación del contenido de arenas, limos y arcilla para cada una de las unidades de suelo.

Unidad de suelo	Arenas (%)		Limos (%)		Arcillas (%)	
	\bar{X}	C.V. (%)	\bar{X}	C.V. (%)	\bar{X}	C.V. (%)
Chinchiná	76,8	5,7	14,0	2,5	9,2	50,3
Montenegro	72,1	8,9	18,1	16,7	9,8	53,7
Fresno	67,8	6,3	20,5	19,3	11,7	2,6
Doscientos	49,9	17,2	32,5	16,3	17,5	19,4
Manila	45,1	66,0	39,5	55,8	15,4	52,0
Sincerín	53,4	20,9	29,1	23,9	17,4	24,3
Cascarero	49,2	23,6	32,2	34,2	18,5	23,0
Tablazo	49,6	52,9	32,9	44,8	17,5	68,3
Chuscal	62,2	15,7	26,8	24,9	10,9	49,8
Violeta	61,4	14,6	24,8	28,7	13,8	13,9
Guamal	15,8	62,0	53,3	13,9	30,9	7,9

de 30,8%, por ende, tuvo los valores más altos de cohesión. En las unidades Chinchiná, Doscientos, Cascarero y Tablazo predominaron las arenas entre 0,5 a 1,0 mm de diámetro, mientras en las unidades Montenegro, Fresno, Manila, Sincerín, Chuscal, Violeta y Guamal, predominaron las fracciones de arena entre 0,10 a 0,25 mm.

Límites de Atterberg. De los 33 suelos estudiados, 20 presentaron plasticidad y estuvieron ubicados en nueve unidades de suelo. Ninguna de las muestras provenientes de las unidades Fresno y Chuscal presentaron plasticidad.

El mayor promedio de límite líquido se registró en la unidad Doscientos (70,4%), el cual le da al suelo una calificación de alta compresibilidad y alto potencial de hinchamiento (9). El mayor índice de plasticidad se determinó en la unidad Guamal (19,7); cabe resaltar que los suelos evaluados presentan valores bajos de índice de plasticidad, lo

cual significa que pueden pasar del estado sólido al líquido con un leve cambio en el contenido de humedad, situación que los hace propensos a los movimientos en masa. El mayor coeficiente de extensibilidad lineal se registró en las unidades Chinchiná y Fresno (0,19 cm.cm⁻¹) y la mayor actividad de las arcillas se determinó en las unidades Chinchiná y Tablazo (0,8).

Clasificación de los suelos con plasticidad.

En general, los suelos se ubicaron por debajo de la línea A de la carta de plasticidad de Casagrande (Figura 1) y se comportaron como limos de media a alta plasticidad. Aquellos suelos ubicados en la categoría II se clasificaron como limos inorgánicos de mediana plasticidad, y los ubicados en la categoría III se clasificaron como limos inorgánicos de alta plasticidad. En esta última categoría sobresalen los suelos de las unidades 200, Chinchiná y Tablazo, propensos a los movimientos en masa según esta clasificación.

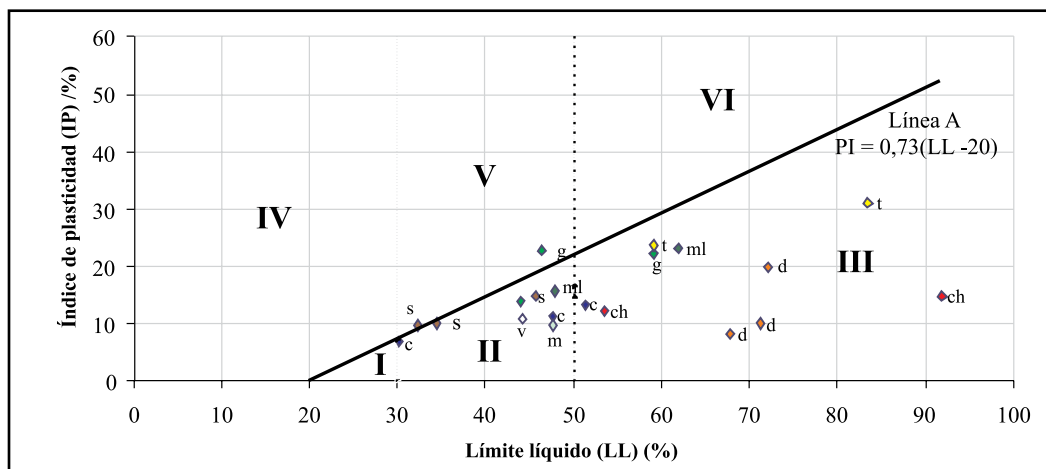


Figura 1. Clasificación unificada de los suelos, de acuerdo con la carta de plasticidad de Casagrande (ch: chinchiná, d: doscientos, ml: manila, t: Tablazo, g: guamal, m: montenegro, v: violeta, s: sincerín, c: cascarero).

Tabla 4. Promedios y coeficientes de variación para densidad aparente, densidad real y porosidad total de los suelos.

Unidad de suelo	Densidad aparente (g.cm ⁻³)		Densidad real (g.cm ⁻³)		Porosidad total (%)	
	\bar{X}	C.V. (%)	\bar{X}	C.V. (%)	\bar{X}	C.V. (%)
Chinchiná	0,68	20,7	2,58	0,5	73,7	7,2
Montenegro	0,69	15,3	2,76	7,1	74,9	4,8
Fresno	0,53	23,3	2,36	1,6	77,4	6,4
Doscientos	0,88	7,3	2,91	1,5	69,9	2,5
Manila	0,97	17,8	2,75	4,1	64,7	11,1
Sincerín	1,22	10,5	2,56	1,0	52,3	9,9
Cascarero	1,17	15,3	2,73	4,7	57,2	8,1
Tablazo	0,93	2,2	2,81	4,9	66,8	3,0
Chuscal	0,84	4,47	2,57	2,7	67,4	1,9
Violeta	0,97	14,2	2,46	1,6	60,3	9,0
Guamal	1,32	12,8	2,45	1,7	46,1	13,2

Propiedades gravimétricas, volumétricas y retención de humedad. En la Tabla 4 se presentan los promedios y coeficientes de variación para las densidades aparente y real y la porosidad total de los suelos. Los suelos derivados de cenizas volcánicas presentaron los menores valores promedio de densidad

aparente (0,5 a 0,7 g.cm⁻³) y los mayores valores de porosidad total (74% a 77%), en tanto, las unidades Guamal, Cascarero y Sincerín presentaron los valores más altos de densidad aparente (1,2 a 1,3 g.cm⁻³) y los más bajos de porosidad (46% a 57%), que indican la susceptibilidad de estos suelos

a saturarse con menores volúmenes agua y los hace más propensos a los movimientos en masa en épocas de lluvias. La densidad real o de partícula presentó valores entre 2,4 a 2,9 g.cm⁻³.

La retención de humedad a 0,33 MPa fluctuó entre 27% y 84%, los valores mínimos se registraron en la unidad Sincerín y los máximos en la unidad Fresno. Este comportamiento también se observó para la retención de humedad a 1,5 MPa, donde los valores promedio oscilaron entre 22% y 69%, respectivamente.

Estabilidad de agregados y DPM. Los suelos derivados de ceniza volcánica y las unidades Doscientos, Tablazo y Chuscal presentaron valores de estabilidad de agregados por encima del 90%, mientras que las unidades Sincerín, Cascarero y Guamal presentaron valores de 56%, 65% y 66%, respectivamente. De acuerdo al DPM, la unidad Fresno se clasificó estructuralmente como estable (3,0 a 5,0 mm), las unidades Chinchiná, Montenegro, Doscientos, Manila, Chuscal y Violeta como moderadamente estables (1,5 a 3,0 mm), y Sincerín, Cascarero, Tablazo y Guamal como ligeramente estables (0,5 a 1,5 mm) (29).

Propiedades químicas de los suelos. Algunas de estas propiedades se relacionan con los materiales de origen, factores de formación, afinidad por los iones y bajos contenidos de materia orgánica (entre 1,6 a 4,8%), característicos del subsuelo en la zona cafetera. La unidad Doscientos que presentó la mayor resistencia al corte directo, mostró los valores promedio más altos de aluminio y materia orgánica y los más bajos de pH; la unidad Montenegro con la menor resistencia al corte directo, además se caracterizó por presentar los valores promedio más altos de pH (Tabla 5).

Resistencia al corte *in situ* y penetrabilidad. Para los métodos de la veleta y resistencia

a la penetración, los valores más bajos se encontraron en la unidad Montenegro, que concuerda con lo encontrado por el método de corte directo. Los valores más bajos se obtuvieron siempre por el método de la veleta, seguidos por el método Torvane, y los más altos se registraron por el método de la resistencia a la penetración (Tabla 6).

Correlación entre la resistencia al corte directo y las propiedades físicas y químicas en suelos con plasticidad. Se encontró correlación lineal simple inversa entre el ángulo de fricción y el índice de plasticidad ($r = -0,43$). Esta relación se debe a que el ángulo de fricción aumenta con incrementos en el tamaño de partículas, por el contrario, un índice de plasticidad alto implica la presencia de partículas finas, con un tamaño menor y, por ende, un ángulo de fricción bajo; dicho índice también proporciona información acerca de la actividad de las arcillas, es así como el incremento en el índice de plasticidad indica que las arcillas poseen alta actividad. Esta relación también la reportan Kanji (1974), Lambe (1985), Mitchell (1993) y Voight (1973) citados por Abramson *et al.* (1). De igual manera, el contenido de azufre presentó correlación con el ángulo de fricción ($r = 0,56$).

El índice de plasticidad y la actividad de las arcillas presentaron correlación inversa con la resistencia al corte directo (Figura 2). De acuerdo con esto, a mayor índice de plasticidad es mayor el rango de humedad en el que el suelo es plástico, dicho índice proporciona una idea del tipo de arcilla del suelo (16); de esta manera un índice de plasticidad alto indica que las arcillas o partículas finas presentes en el suelo poseen alta actividad, lo que conduce a un alto potencial de expansión y contracción, esto genera inestabilidad en el suelo, ya que modifica la estructura del mismo y, por lo tanto, decrece la resistencia al corte (34).

Tabla 5. Valores promedio de las propiedades químicas de los suelos.

Unidad de suelo	pH	MO	CIC	K	Ca	Mg	Al	Na	Fe	Mn	S
		(%)	(cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)						(mg.kg ⁻¹)		
Chinchiná	5,7	2,1	20,0	0,3	1,1	0,2	0,3	0,1	136	3,7	13,4
Montenegro	6,3	2,0	19,3	0,1	4,8	0,3	0,1	0,1	133	2,0	0,0
Fresno	5,6	1,6	18,0	0,2	0,9	0,2	0,1	0,0	129	2,7	10,8
Doscientos	5,1	4,8	24,0	0,2	4,0	2,0	5,9	0,1	204	87,7	14,8
Manila	5,5	1,9	12,7	0,1	2,7	3,1	0,5	0,1	139	21,7	8,9
Sincerín	5,7	1,6	11,3	0,3	4,5	1,3	0,5	0,1	330	38,0	6,7
Cascarero	5,6	3,5	15,0	0,1	5,3	2,3	0,9	0,1	180	23,7	2,4
Tablazo	5,7	1,9	18,0	0,2	3,6	2,1	1,6	0,1	104	4,0	3,8
Chuscal	5,8	3,9	14,7	0,2	3,3	0,7	0,3	0,2	483	22,7	12,5
Violeta	5,9	1,9	10,7	0,9	2,0	0,4	0,5	0,1	337	12,7	5,2
Guamal	5,2	3,0	18,0	0,3	4,8	4,2	4,4	0,0	182	32,3	2,8

Tabla 6. Valores promedio y coeficientes de variación de resistencia al corte y penetrabilidad *in situ* por el método de la veleta, Torvane y el penetrómetro de golpe.

Unidad de suelo	Resistencia al corte método de la veleta (kPa)		Resistencia al corte método Torvane (kPa)		Resistencia a la penetración (kPa)	
	\bar{X}	C.V. (%)	\bar{X}	C.V. (%)	\bar{X}	C.V. (%)
Chinchiná	72,7	43,2	284,4	6,9	341,2	37,7
Montenegro	48,0	39,6	150,4	22,9	301,0	38,8
Fresno	63,1	15,1	117,8	31,2	358,8	15,1
Doscientos	68,6	25,0	273,9	38,6	522,2	41,0
Manila	98,6	16,7	206,6	0,6	559,1	17,5
Sincerín	82,3	20,0	217,1	33,0	558,5	40,1
Cascarero	60,3	19,7	169,0	57,2	656,7	35,2
Tablazo	49,4	41,7	147,8	32,6	330,0	68,5
Chuscal	48,0	17,8	224,3	48,2	330,8	23,8
Violeta	68,6	48,5	212,5	19,2	456,5	45,8
Guamal	90,5	18,2	368,1	10,2	559,2	26,2

La relación inversa entre el índice de plasticidad y la resistencia al corte también fue encontrada por Suzuki *et al.* (35), quienes reportan que el índice de plasticidad es una

de las propiedades más relacionadas con la resistencia al corte.

Las propiedades químicas que presentaron mayor correlación en suelos plásticos fueron

aluminio, materia orgánica y pH. El coeficiente de correlación entre el Al y la resistencia al corte directo fue de 0,52 (Figura 2), debido posiblemente a que el aluminio es uno de los cementantes más importantes del suelo, que ayuda a formar estructuras estables (29).

Igual comportamiento se observó con los contenidos de materia orgánica (Figura 2), la correlación entre ambas propiedades se debe posiblemente a que la materia orgánica presenta

interacción con otros componentes del suelo como iones metálicos y arcillas, y debido a su efecto cementante crea estructuras muy estables. La relación entre materia orgánica y resistencia al corte es también reportada por varios autores (10, 38, 36).

Se registró una correlación inversa entre la resistencia al corte directo y el pH ($r = -0,50$) (Figura 2). Suzuki *et al.* (35) y Omar

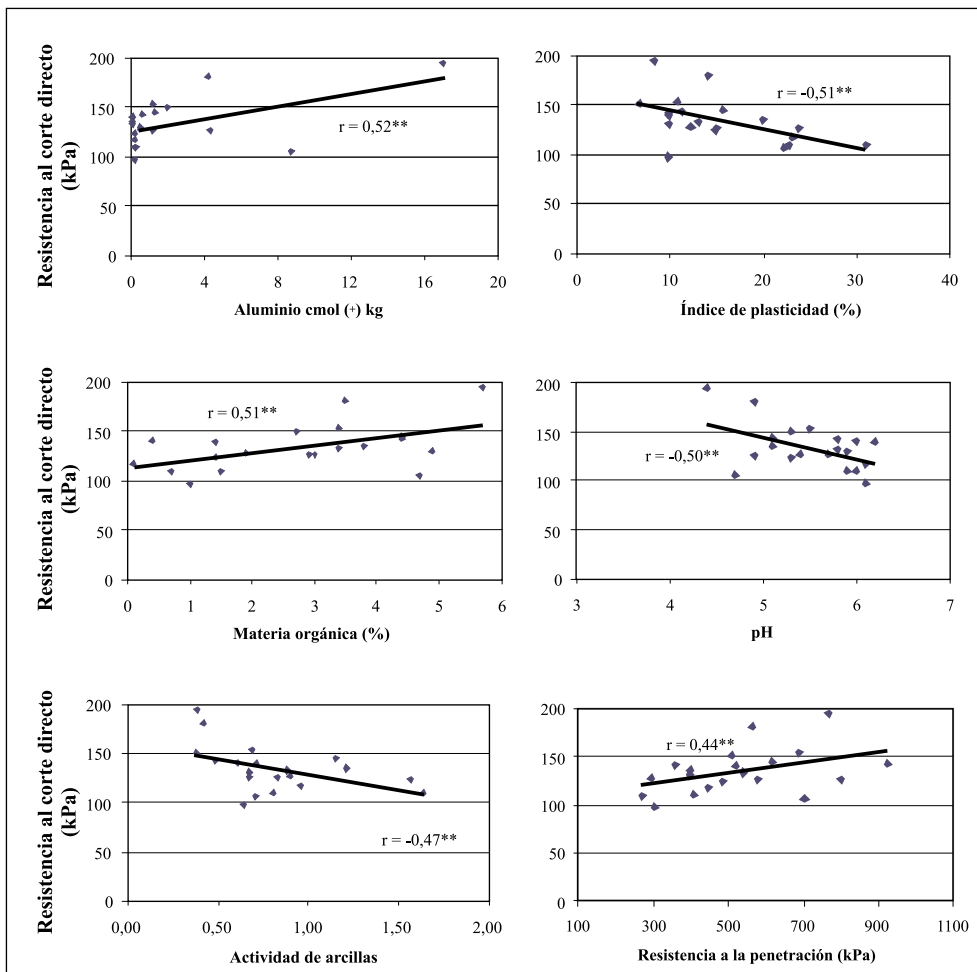


Figura 2. Correlación entre la resistencia al corte determinada por el método directo y propiedades físicas y químicas en suelos plásticos. ****** $P < 0,01$.

et al. (27) reportan una relación similar e indican que los suelos ácidos poseen una mayor resistencia al corte que los suelos básicos, debido a que la estructura del suelo tiende a ser más floculada que dispersiva por los bajos valores de pH. Además, el pH mostró una correlación inversa con el aluminio ($r=-0,72$) y la materia orgánica ($r=-0,68$), que son elementos importantes en cuanto a la estabilidad del suelo.

Correlación entre los parámetros de resistencia al corte directo y propiedades físicas y químicas en suelos sin plasticidad.

Las arenas entre 0,25mm a 0,5mm de diámetro presentaron correlación lineal simple ($r=0,55$) con el ángulo de fricción interna.

Correlación entre métodos para la determinación de resistencia al corte y penetrabilidad.

La resistencia a la penetración presentó una correlación lineal simple con el método de corte directo en suelos plásticos (Figura 2); esta relación ha sido reportada por otros autores (3, 28). A su vez, la resistencia a la penetración presentó una correlación inversa con el pH ($r=-0,54$) y la actividad de las arcillas ($r=-0,43$) y correlación directa con el contenido de materia orgánica ($r=0,62$) y el contenido de hierro ($r=0,56$).

El método de la veleta no presentó correlación con el método de corte directo ni con alguno de los otros métodos en suelos plásticos, contrario a lo reportado por Marshall *et al.* (25) quienes sugieren que en suelos plásticos la veleta proporciona una determinación adecuada de la resistencia al corte, O'Sullivan y Ball (28) reportan que la veleta proporciona resultados similares en resistencia a los obtenidos por el método directo, y Suárez (34) indica que el ensayo de la veleta es uno de los más útiles para obtener el valor de la resistencia al corte. De igual

manera, el Torvane no presentó correlación con la resistencia al corte directo.

En suelos sin plasticidad, la resistencia al corte determinada por el método de corte directo presentó correlación con el método de la veleta ($r=0,55$). La resistencia al corte, determinada por el método de la veleta, presentó correlación inversa con el pH ($r=-0,60$) al igual que lo encontrado en suelos plásticos, y también presentó correlación con el calcio ($r=-0,57$).

Finalmente, se puede considerar que las propiedades físicas (índice de plasticidad, penetrabilidad) y químicas (materia orgánica, pH, Al) se relacionan linealmente con la resistencia al corte directo de los suelos estudiados.

Las prácticas agrícolas, culturales y de ingeniería que contribuyan al incremento de la resistencia al corte de los suelos de la zona cafetera son importantes en la mitigación de los movimientos en masa. En suelos de baja cohesión (< 25 kPa), estas prácticas deben conducir al incremento de la cohesión con la vegetación arbórea y arbustiva (4), el mejoramiento y conservación de los contenidos de materia orgánica y las obras de confinamiento o consolidación con tratamientos de bioingeniería (31, 32).

En el caso de suelos con altos valores de cohesión (aproximado a 50 kPa) y, por ende, bajos valores en su ángulo de fricción interna (11° a 25°), se debe evitar que pierdan la cohesión debido a la saturación. Por tal motivo se recomienda la captación y conducción de aguas de escorrentía para evitar su saturación, disminuir el grado de pendiente teniendo como referencia el ángulo de fricción, y propiciar el anclaje y la regulación hídrica por la vegetación.

AGRADECIMIENTOS

A los caficultores propietarios de las fincas donde se realizaron los muestreos por su apoyo y colaboración. A los Comités de Cafeteros de Caldas y Tolima, a la Estación Central Naranjal y la Subestación Paraguaicito. A los doctores Édgar Hincapié G., Alveiro Salamanca J., Siavosh Sadeghian Kh., Hernán González O. y Beatriz Mejía M. de la Disciplina de Suelos. A Multilab Agroanalítica y al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, por la colaboración en la realización de los análisis químicos y mecánicos. A los doctores Franco Humberto Obando M. y Carmen Soledad Morales L. profesores de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Caldas por su formación, asesoría y colaboración.

LITERATURA CITADA.

1. ABRAMSON, L.W.; LEE, T.S.; SHARMA, S.; BOYCE, G.M. Slope stability and stabilization methods. 2a. ed. New York : John Wiley & Sons, 2002. 712 p.
2. AGUILAR M.V.; MENDOZAG., D.P. Aproximación a un modelo de susceptibilidad a movimientos de masa en el eje cafetero, Colombia. Cali : Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería, 2002. 214 p. Trabajo de grado: Ingeniero topógrafo.
3. ANAGNOSTOPOULOS, A.; KOUKIS, G.; SABATAKAKIS, N.; TSIAMBAOS, G. Empirical correlations of soil parameters base don cone penetration tests (CPT) for Greek soils. Geotechnical and Geological Engineering 21:377-387 2003.
4. BARRERA G., J.E. Evaluación del sistema radical de cuatro especies vegetales en la estabilidad de laderas de la zona cafetera colombiana. Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003. 137 p. Trabajo de grado: Ingeniero forestal.
5. BLAKE, G.R.; HARTAGE, K.H. Bulk density. p. 363-375. En: KLUTE, A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2nd. ed. Madison : American Society of Agronomy : Soil Science Society of America, 1986. 1188 p.
6. -----. Particle density. p. 377-382. En: KLUTE A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2nd. ed. Wisconsin : American Society of Agronomy : Soil Science Society of America, 1986. 1188 p.
7. CARRILLO, I. F. Manual del laboratorio de suelos. Chinchiná : Cenicafé, 1985. 111 p.
8. DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. p. 443-461. En: KLUTE A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2nd. ed. Madison : American Society of Agronomy : Soil science society of America, 1986. 1188 p.
9. DAS, B.M. Principles of geotechnical engineering. 5a. ed. Toronto : Thomson Learning, 2002. 589 p.
10. DAVIES, P. Influence of organic matter content, moisture status and time after reworking on soil shear strength. The Journal of Soil Science 36(2):299-306 1985.
11. FNC. Programa de desarrollo y diversificación. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Caldas. Bogotá : FNC : PRODESARROLLO, 1982. 309 p.
12. -----. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento del Quindío. Bogotá : FNC, 1986. 144 p.
13. -----. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del Departamento del Tolima. Bogotá : FNC, 1973. 93 p.
14. FLOREZ, A. Geomorfología del área Manizales – Chinchiná, Cordillera Central, Colombia. Amsterdam : Universidad van Amsterdam. Facultad de Matemáticas y Ciencias, 1986. 159 p. Trabajo de grado: Doctor en Geografía Física.
15. GARDNER, H.W. Water content. p. 493-544. En: KLUTE A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2nd. ed. Wisconsin : American Society of Agronomy : Soil Science Society of America, 1986. 1188 p.
16. GAVANDE, S.A. Física de suelos: Principios y aplicaciones. México : Limusa, 1987. 351 p.
17. GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. p. 377-382. En: KLUTE A. Methods of soil

- analysis: Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph 9, 2ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin USA. 1986.
18. GÓMEZ A., A.; GRISALES G., A.; SUÁREZ S., J. Manual de conservación de suelos de ladera. Chinchiná : Cenicafé, 1975. 267 p.
 19. GRISALES G., A. Suelos de la zona cafetera; clasificación y uso. Medellín : Fondo Cultural Cafetero, 1977. 142 p.
 20. HERRICK, J.E; JONEST.L. Adinamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. Soil Science Society of America Journal 66(4):1320-1324. 2002.
 21. IDEAM. El medio ambiente en Colombia. [En línea]. Bogotá : IDEAM, 2001. 543 p. Disponible en internet: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Publicaciones&lTipo=publicaciones&lFuncion=loadContenidoPublicacion&id=133>. Consultado el 15 de abril de 2010.
 22. IGAC. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Caldas [cd rom] 2a. ed. Bogotá : IGAC, 2004.
 23. KLUTE A. Water retention: Laboratory methods. p. 635-662. En: KLUTEA. Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph 9, 2ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin USA. 1986. 1188 p.
 24. KLUTE A.; DIRKSEN C. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. p. 687-734. En: KLUTE A. Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph 9, 2ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin USA. 1986. 1188 p.
 25. MARSHALL, T.J.; HOLMES, J.W.; ROSE, C.W. Soil physics. 3a. ed. Cambridge : Cambridge University Press, 1996. 453 p.
 26. MONTOYA R., E.C. El método científico. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 140 p.
 27. OMAR, M.; SHANABLEH, A.; TAHMAZ, A. Shear strength of compacted green clay physico-chemical factors. Lowland Technology International 6(1):9-20. 2004.
 28. O'SULLIVAN, M.F.; BALL, B.C. A comparison of five instruments for measuring soil strength in cultivated and uncultivated cereal seedbeds. The Journal of Soil Science 33:597-608 1982.
 29. RIVERA P., H. Fenómenos asociados a la agregación y degradación de los suelos. Medellín : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas, 1994. 247 p. Trabajo predoctoral : Doctor en aprovechamiento de recursos hidráulicos
 30. -----. Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. Chinchiná : Cenicafé, 1998. 8 p. (Avances Técnicos No. 256).
 31. -----. Control de derrumbes y negativos en carreteras mediante tratamientos de tipo biológico. Chinchiná : CENICAFE, 1999. 8 p. (Avances Técnicos No. 264).
 32. -----. Manejo y estabilización de taludes en zonas de ladera mediante tratamientos de bioingeniería. Chinchiná : CENICAFE, 2001. 8 p. (Avances Técnicos No. 291).
 33. STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI N., V.L. Penetrômetro de impacto modelo IAA/ Planalsucar-Stolf: Recomendação para seu uso. Piracicaba 1(3):18-23. 1983.
 34. SUÁREZ D., J. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 1998. 548 p.
 35. SUZUKI, M.; TSUZUKI, S.; YAMAMOTO T.; Physical and chemical index properties of residual strength of various soils. Memoirs of the Engineering Faculty of Yamaguchi University 56(1):1-11. 2005.
 36. TERLIEN, M.T.J. Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides: The integration of hydrologic model, slope stability models and geographic information systems for the hazard zonation of rainfall-triggered landslides with examples from Manizales (Colombia). Enschede [Holanda] : International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 1996. 254 p.
 37. UNITED STATES. Department of agriculture. Soil survey laboratory methods manual: Soil Survey Investigations Report No. 42 Version 3.0. Washington: USDA, 1996. 693 p.

38. UPADHYAYA, S.K.; CHANCELLOR, W.J.; PERUMPRAL, J.V.; SCHAFER, R.L.; GILL, W.R.; VANDENBERG, G.E. Advances in soil dynamics. St. Joseph (Estados Unidos): ASAE, 1994. 313 p.
- 39 WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37:29-38. 1934
40. YILMAZ, I. Evaluation of shear strength of clayey soils by using their liquidity index. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 59:227-229. 2000.
41. YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. Journal of American Society of Agronomy 28:337-351. 1936.