

SUSCEPTIBILIDAD Y PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN EN SUELOS DE LADERA DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA ¹

José Horacio Rivera P.²

RESUMEN

El presente trabajo, se realizó durante dos fases. En la primera fase del estudio, mediante mediciones usando un simulador de lluvias en condiciones de laboratorio y aplicando una intensidad de lluvia de 100 mm h⁻¹, equivalente a una energía cinética de 0,002936 J cm⁻².mm de lluvia, se determinaron dos índices de erodabilidad, K_i o erodabilidad entre surcos, del Proyecto de Predicción de Erosión por el Agua (WEPP) (Lal, 1994a; Nearing *et al.*, 1989) y K de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978). Para las determinaciones se usaron cinco suelos de la zona cafetera colombiana con tres fracciones de tamaños de agregados (2-1 mm; 1-0,5 mm y <0,5 mm). Se seleccionaron suelos contrastantes en textura y contenido de materia orgánica y representativos de la zona cafetera colombiana en producción de café. Tres suelos son derivados de cenizas volcánicas Chinchiná, Montenegro y Fresno (Melanudands) y Parnaso y Guamal (Typic eutropepts), derivados de basaltos y areniscas olivínicas (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FEDERACAFÉ), 1982a, 1982b). Las muestras de suelos fueron tomadas de los primeros 10 cm de profundidad, empacadas en bandejas preparadas manualmente antes de cada simulación de lluvia. Las bandejas fueron inclinadas con un gradiente del 70% representativo de los suelos de la zona cafetera colombiana. Las bandejas se equiparon con una lámina metálica a su alrededor para coleccionar los suelos provenientes de la dispersión de agregados causada por el impacto de la gota de lluvia, tres dispositivos para coleccionar las aguas y pérdidas de suelo provenientes de escorrentía, percolación y dispersión (Truman y Bradford, 1995; Bajracharya *et al.*, 1992).

El flujo de agua por percolación para los suelos derivados de cenizas volcánicas presentó un rango entre 65 a 91%. En contraste con el flujo por escorrentía para el suelo arcilloso Guamal, el cual mostró un rango entre 55 a 75%. En relación con el tamaño de agregados de suelo, la mayor escorrentía fue observada en agregados <0,5 mm. Las pérdidas mayores de suelo por erosión ocurrieron por dispersión de agregados y suelo depositado en el canal colector de aguas de escorrentía. La pérdida más alta de suelos por escorrentía se presentó en la unidad Guamal. Los lodos suspendidos en superficie en las aguas de escorrentía y percolación fueron muy bajos para todos los suelos excepto para el tamaño de agregado <0,5 mm. Los valores más altos de erodabilidad se encontraron en los suelos con agregados <0,5 mm. La magnitud de K_i y K respectivamente fue 13,76 x 10⁶ a 53,94 x 10⁶ y 0,01 a 0,05 para la Unidad Guamal, 1,39 x 10⁶ a 25,39 x 10⁶ y 0,001 a 0,02 para Montenegro, 1,91 x 10⁶ a 13,25 x 10⁶ y 0,002 a 0,01 para Chinchiná, 2,05 x 10⁶ a 11,5 x 10⁶ y 0,002 a 0,004 para Parnaso y 1,98 x 10⁶ a 8,75 kg. s m⁻⁴ x 10⁶ y 0,002 a 0,008 Mg.ha.h.MJ⁻¹.mm⁻¹.ha⁻¹. para Fresno.

Al correlacionar 35 parámetros físico-químicos con la erodabilidad de los suelos, a la profundidad de 0 – 10 cm, se encontró, un incremento de ésta cuando decrece el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y el tamaño de agregados del suelo.

En la segunda fase del trabajo, se determinaron 71 propiedades físico-químicas de los suelos, para lo cual se efectuaron muestreos en el campo en tres usos (bosque, café y pastos) y cuatro profundidades (0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm). Mediante correlaciones lineales simples y multivariadas, entre los índices de erodabilidad de los suelos y las propiedades físico-químicas, se determinó para predecir el K_i del WEPP, la ecuación $K_i^2 = 136,7 - 97,83 (AG1-0,5SA) + 16,43 (AG1-0,5SA)^2$, como la más promisoría de usar. Esta ecuación presenta coeficiente de determinación ajustado alto, con R² de 1,00 altamente significativo para la variable agregados sin arenas estables en agua entre 1-0,5 mm de diámetro (AG1-0.5SA). Para predecir el K de la USLE para cada una de las cinco unidades de suelos estudiadas, se considera la ecuación $K^3 = 389E-8 - 39E-7 (AG1-0,5SA) + 685E-9 (AG1-$

¹ Compendio de Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, Colombia. Patrocinado por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y Colciencias (RIVERA P., H 1999a).

² I.A. Ph.D. Líder Disciplina Conservación de Suelos. CENICAFE, Chinchiná. AA 2427 Manizales Colombia. Email: Horacio.Rivera@cafedecolombia.com.

0.5SA)², como la más promisoría de usar. Esta ecuación presenta coeficiente de determinación ajustado alto, con R² de 0,99 altamente significativo para la variable agregados sin arenas estables en agua entre 1-0,5 mm de diámetro (AG1-0.5SA). Para predecir el K de la USLE para cada una de las cinco unidades de suelos estudiadas, se considera la ecuación $K^3 = 389E-8 - 39E-7 (AG1-0.5SA) + 685E-9 (AG1-0.5SA)^2$, como la más promisoría de usar. Esta ecuación presenta coeficiente de determinación ajustado alto, con R² de 0,99 altamente significativo para la variable agregados sin arenas estables en agua entre 1-0,5 mm de diámetro (AG1-0.5SA). Con las correlaciones lineales simples entre propiedades físicas, se encontró la ecuación $Da = 0,2267 + 0,0665 \times RFP$, con un coeficiente de determinación altamente significativo (R² = 0,99) entre la resistencia final del suelo a la penetración (RFP) y la densidad aparente.

SUSCEPTIBILITY AND PREDICTION OF THE EROSION IN HILLSIDE SOILS OF THE COLOMBIAN CENTRAL COFFEE ZONE

ABSTRACT

In the first phase of the work, through measurements using a laboratory rainfall simulator and applying a rain intensity of 100 mm h⁻¹, equivalent to a kinetic energy of 0.002936 J cm⁻².mm of rain, were determined two indices of erodibility, K_i or Interrill erodibility for the WEPP (Lal, 1994; Nearing *et al.*, 1989), and K of the USLE (Wischmeier and Smith, 1978). Five soils from the Colombian Coffee Zone, with three aggregates size fractions (1-2mm; 0.5-1mm, and < 0.5mm), were selected based on contrasting textural composition and soil organic matter content, and representatives in the Coffee Zone. Three soils are derived from volcanic ash (Melanudands), and two (Parnaso and Guamal soils, Typic eutropepts) from basalt and olivine sandstone (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1982a, 1982b). Soil samples were taken from the top 100 mm depth, packed in soil trays prepared manually just before each rainfall simulation run. These trays are equipped with splash board, runoff and percolation collection devices (Truman and Bradford, 1995; Bajracharya *et al.*, 1992), and fitted on a stand with a gradient of 70%, the representative slope of the Colombian Coffee zone.

The percolation rate for the volcanic ash soils ranged from 65% to 91%. In contrast, the runoff rate for the clayey soil Guamal (Typic Eutropepts) ranged from 55% to 75%. The highest runoff for all soils was observed for aggregate size range < 0.5 mm. Most soil loss occurred by splash and bedload deposited in the channel. The highest soil loss by runoff was observed for the Guamal soil unit (Typic eutropepts) probably due to low structural stability. The suspended load in surface runoff and percolation water was very low for all soils, except for the aggregate size range < 0.5mm. High soil erodibility values were observed in soil aggregate size range < 0.5mm and were in the order of parent material olivine > basalt > sand stone > volcanic ash soils. The magnitude of K_i and K, respectively, was 13.76 x 10⁶ to 53.94 x 10⁶ and 0.01 to 0.05 for Guamal, 1.39 x 10⁶ to 25.39 x 10⁶ and 0.001 to 0.02. for Montenegro, Melanudands, 1.91 x 10⁶ to 13.25 x 10⁶ and 0.002 to 0.01 for Chinchina, Melanudands, 2.05 x 10⁶ to 11.5 x 10⁶ and 0.002 to 0.004 for Parnaso, Typic eutropepts and 1.98 x 10⁶ to 8.75 x 10⁶ Kg s/m⁴ and 0.002 to 0.008 t.ha.h./Mj.mm.ha. for Fresno Melanudands. Soil erodibility increased with decreased in soil organic matter content and decrease in aggregate size. Rivera and Gómez, 1991a, 1991b reported similar relationship of erodibility in the soil organic matter content. Soil erodibility values measured, are very high, which indicate that soils of the Colombian Coffee Zone are highly susceptible to erosion. Suarez de Castro and Rodriguez, 1962 reported soil loss of 500 Mg ha⁻¹.year in field runoff plots.

A relationship between 35 physical and chemical parameters with erodibility of soils, to the depth of 0 - 10 cm, was found, an increase of the erodibility of soils when decreases the organic matter content, the exchange capacity cationic and the aggregates size of the soils.

In a second phase of the work, were determined 71 physical and chemical properties of soils, for which were taken samplings in the field in three uses (forest, coffee and grass) and four depths (0-10, 10-20, 20-40 and 40-60 cm). Through simple linear correlation and multivariate analysis, between indices of erodibility of soils and physical and chemical properties, were determined ten equations, being considered as more important: $K_i^2 = 136,7 - 97,83 (AG1-0.5SA) + 16,43 (AG1-0.5SA)^2$ and $K^3 = 389E-8 - 39E-7 (AG1-0.5SA) + 685E-9 (AG1-0.5SA)^2$, with coefficients of determination R² = 1.00 and R² = 0.99 respectively, statistically significant. The variable

used was percentage of aggregates between 1 to 0.5 mm without sands (AG1-0.5SA). These equations permit to predict the indices of erodibility K_i and K , for five studied soil units.

With the simple linear correlation between physical properties, was found the equation D_a (Bulk density) = $0.2267 + 0.0665 \times \text{RFP}$ (Final Resistance to Penetration), with a coefficient of determination ($R^2 = 0.99$) statistically significant.

INTRODUCCION

La degradación de los recursos suelo y agua y la contaminación ambiental, son percibidos como los problemas mayores en los trópicos. Existen áreas extensas de tierras, que están siendo sometidas a la degradación en forma irreversible, procesos degradativos como la erosión acelerada y la desertificación, compactación y endurecimiento, acidificación, disminución en el contenido de materia orgánica, disminución de la biodiversidad y agotamiento de la fertilidad natural del suelo. El área degradada en el trópico por diferentes procesos es estimada en 915×10^6 de hectáreas por erosión hídrica, 474×10^6 de hectáreas, como erosión por el viento, 50×10^6 de hectáreas, por degradación física, y 213×10^6 de hectáreas, por degradación química (Lal, 1994b).

Las pérdidas altas de productividad de los suelos por procesos degradativos como la erosión por el agua, ha conducido a los investigadores de diversos países del mundo a la realización de estudios numerosos de suelos y aguas para cuantificarla, con el fin de predecir la erosión tolerable bajo determinadas condiciones (lluvia, suelos, pendiente, cultivos) lo que facilitaría la selección de prácticas integrales de conservación (prácticas agronómicas, obras civiles, construcciones, conducción de aguas de escorrentía entre otras), para diferentes usos del suelo y su protección, a los niveles de finca y cuenca hidrográfica.

En los Estados Unidos de América Wischmeier y Smith (1978), lograron establecer una ecuación que denominaron "Ecuación Universal de Pérdida de Suelo", en la cual están involucrados los factores activos, pasivos y atemperantes, causantes de erosión.

Según Wischmeier citado por Meyer, 1984, el nombre de Ecuación Universal de Pérdida de Suelo por Erosión se originó, en el sentido de diferenciarla de los modelos regionales que la precedieron. Ninguno de sus factores utiliza un punto de referencia que tenga orientación geográfica directa. En el sentido de las funciones propuestas de seis factores de la Ecuación, el modelo debe tener validez Universal. Sin embargo, su aplicación esta limitada a Estados y Países donde la información esta disponible para evaluaciones locales de los factores individuales de la Ecuación. Los efectos naturales indicados de Topografía, Cobertura y variables de Manejo, son probablemente Universales, pero no se ha mostrado que la relación específica para Longitud (L), Pendiente (S) y Cultivo (C), derivados de los suelos principales de los Estados Unidos, sea necesariamente correcto para suelos diferentes, como los de origen volcánico. El efecto de la pendiente en situaciones donde excede el 20%, es aún un vacío serio en la información investigada. La validez del término Universal depende de su interpretación. En el sentido de las funciones propuestas de los seis factores de la ecuación, la validación del modelo no debe tener límites geográficos. Pero su aplicabilidad esta limitada por la disponibilidad de los valores locales representativos para cada factor.

El 40% del territorio colombiano presenta erosión de muy ligera a muy severa y la zona Andina, donde se encuentra la región cafetera colombiana, es la más afectada con un 88% de erosión hídrica (Olmos y Montenegro (1987). La pérdida de suelo crece de año en año, debido a la presión demográfica, falta de conocimiento sobre la metodología para evaluar la erosión potencial, con un buen rango de acierto para orientar a los agricultores, al gobierno e instituciones afines, en la toma de decisiones más acertadas y acordes con el medio Tropical.

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, ha venido trabajando en la determinación de los factores: R, índice de erosividad de las lluvias, mediante el uso de los índices de erosión pluvial de Fournier (1975) y de Hudson (1982); K, susceptibilidad del suelo a la erosión, a través de índices de erodabilidad; L, longitud de la pendiente; S, grado de la pendiente; C, uso en cultivo y P, prácticas de conservación de suelos, en parcelas de escorrentía diseñadas para estudiar y evaluar el comportamiento de estos parámetros en la zona Cafetera central colombiana, en suelos de ladera (Melanudands), bajo sistemas diversos de producción de café y de otros cultivos (Suárez de Castro 1980, Gómez 1987, Rivera 1990, Rivera y Gómez, 1991a, 1991b). Sin embargo, los datos reales de erosión no han podido ser reproducidos por la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, debido a la especificidad del medio tropical.

La combinación de los parámetros de la ecuación para diferentes condiciones, permite obtener un valor estimado sobre las pérdidas de suelo que se sucederían por erosión hídrica. En los países tropicales y especialmente en la Zona cafetera colombiana, debido a la variabilidad de los factores climáticos,

topográficos, de susceptibilidad de suelos y de usos agrícolas diferentes al país del norte donde fue calibrada, se hace necesario conducir investigaciones que ayuden a la cuantificación de los valores de cada uno de los parámetros involucrados en la obtención de valores reales de erosión los cuales permitirían determinar y comparar la fragilidad de las diferentes regiones en el agroecosistema cafetero.

Actualmente, con el fin de superar las limitaciones encontradas en la Ecuación Universal de pérdida de Suelo por Erosión, se desarrolló El proyecto de Predicción de Erosión por el Agua (WEPP), concebido para reemplazar la Ecuación Universal de Erosión (USLE), la cual ha sido usada en los suelos agrícolas en los Estados Unidos y en muchos países del mundo. El WEPP ha requerido más que una década de investigación extensiva, de experimentos sobre erodabilidad de suelos para análisis estadísticos, para ecuaciones de predicción de tasas pico de escorrentía.

Los desarrolladores del WEPP, han intentado entender como opera la naturaleza en orden a predecir el curso futuro de los eventos naturales, como la erosión (Lafren, 1997). El WEPP, es un instrumento importante, para ayudar a los planificadores a seleccionar las rutas mejores para producir en una finca específica, y protegerla con base en sus suelos, topografía y clima. Esto ayudará a los propietarios a conservar sus pozos y diques libres de sedimentos (Lafren, 1997).

A diferencia de tecnologías previas a el WEPP, que fueron desarrolladas estadísticamente para observaciones en un número limitado de sitios, el WEPP esta basada en procesos y por tanto trabaja para todos los sitios.

En la zona cafetera colombiana la lluvia es el agente activo natural principal de la erosión (erosividad), debido a la frecuencia y a la energía cinética de los aguaceros por su intensidad alta. La erosión se ve favorecida, además, por las pendientes fuertes (mayores del 75%) y longitudes del terreno muy largas (Mayores de 800 m) y la heterogeneidad y juventud de los suelos (entisoles e inceptisoles), en su mayoría susceptibles a la erosión (Federacafé, 1975).

La clasificación de los suelos en el país y especialmente en la zona cafetera, en cuanto a susceptibilidad a la erosión, ha estado sujeta a rangos cualitativos, estimados a partir de experimentación en otros países, necesitando por lo tanto definirlos para las condiciones colombianas. Es así, como un suelo con erodabilidad baja, puede mostrar signos de erosión severa, cuando la pendiente está muy inclinada y larga, o está localizado en zonas con lluvias de intensidades altas y viceversa.

Rivera (1990), determinó para la zona cafetera central (Caldas, Quindío y Risaralda), el factor erodabilidad, en forma indirecta utilizando la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith (1978), la cual permite determinar el factor erodabilidad de los suelos con contenidos máximos de materia orgánica del 12%. Esto limita su uso para gran cantidad de suelos de la zona cafetera con cantidades de materia orgánica superiores a dicho valor. Esta situación conduce a la necesidad de trabajar con ecuaciones que lleven intrínsecos los procesos, los cuales si son universales, caso del WEPP.

OBJETIVOS

General:

Determinar y evaluar el factor erodabilidad (K) en cinco suelos de la región cafetera colombiana, utilizando los criterios del WEPP y de la USLE.

Específicos:

1. Escoger las unidades de suelo en las que el café es el cultivo dominante y que representen la gamma de suelos de la Zona Andina Cafetera Central de Colombia.
2. Determinar el balance de agua de los suelos en condiciones de laboratorio (escorrentía, percolación y almacenamiento), de los diferentes suelos para conocer y entender procesos dominantes y relacionarlos, con la susceptibilidad de los suelos a la erosión.

3. Calcular el factor erodabilidad K_i del WEPP y (K) de la USLE, mediante el uso de un simulador de lluvias en condiciones de laboratorio.
4. Determinar en los suelos escogidos, para tres usos diferentes y cuatro profundidades, las propiedades físicas y químicas más relacionadas con la susceptibilidad de los suelos a la erosión.
5. Encontrar un modelo que permita predecir la erodabilidad de los suelos de la Zona Cafetera Colombiana estudiada, con base en las características estudiadas, para utilizarlo en la planificación del uso, manejo y conservación de los suelos de la Zona Cafetera Central Colombiana

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Fueron seleccionadas cinco unidades de suelos, con base en características contrastantes en textura, contenido de materia orgánica y pendiente del 75% o mayor y representativos para el cultivo del café. Tres de los suelos, son derivados de cenizas volcánicas: Unidades Chinchiná, Montenegro y Fresno, Melanudands. Las dos Unidades restantes, Guamal y Parnaso, Typic eutropepts, son derivadas de areniscas olivínicas y basalto respectivamente (Tabla 1).

Tabla 1. Localización de los sitios de muestreo de suelos y sus condiciones climáticas

Departamento Municipio	Unidad Suelo	Altitud (m)	Lluvia (mm) Media	Días luciosos #	T° Media (°C)	Hrelativa anual (%)
CALDAS						
– Chinchiná	Chinchiná, <i>Melanudands</i>	1400	2.665	251	20,6	78
– Marquetalia	Fresno, <i>Melanudands</i>	1450	3.627	216	20,8	82
– Supía	Guamal, <i>Typic eutropepts</i>	1.200	2.254	183	21,7	75
QUINDÍO						
– Quimbaya	Montenegro, <i>Melanudands</i>	1450	2.004	203	20,8	78
VALLE						
– Sevilla	Parnaso, <i>Typic eutropepts</i>	1.540	1.617	188	20,3	82

El trabajo se desarrolló en dos Fases, siendo por tanto necesario efectuar dos muestreos por unidad de suelo:

Fase I: Muestreo de suelos para trabajar con un Simulador de lluvias en el Laboratorio de Física de Suelos de la Universidad del Estado de Ohio*, Estados Unidos.

Fase II: Muestreo de suelos para la caracterización de propiedades físicas y químicas en tres usos (bosque, café y pastos) y cuatro profundidades (0 – 10, 10 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm), en el perfil del suelo.

Materiales y Métodos de la Fase I

Muestreo de suelos para determinación de la erodabilidad usando el simulador de lluvias.

Se tomaron muestras de suelo en el campo a profundidad de 0 – 10 cm, para determinar los índices de erodabilidad con el uso del simulador de lluvias en el Laboratorio de Física de Suelos de la Universidad del Estado de Ohio Estados Unidos y algunas propiedades físicas y químicas de los suelos en el laboratorio de Cenicafé, Chinchiná Colombia.

Para la determinación de los índices de erodabilidad se conformaron muestras compuestas al azar provenientes de 45 sitios de muestreo para cada una de las cinco Unidades de suelos estudiadas, equivalente a

* Fase Asesorada por el Doctor Rattan Lal, Ph.D Professor School of Natural Resources 2021 Coffey Road Columbus, OH 43210. Email: lal.1@osu.edu

225 sitios de muestreo en total para las cinco unidades de suelos. Se estudiaron Unidades de suelos ubicadas en diferentes regiones de la Zona Cafetera Colombiana (Tabla 1). Los suelos fueron seleccionados, con base en características contrastantes en cuanto a textura, contenido de materia orgánica y pendiente del 75% o mayor y representativos para el cultivo del café.

Los suelos estaban sembrados en cultivos perennes, tales como bosque, café y pastos. De cada una de las cinco unidades, se tomaron 50 kg de suelo a una profundidad entre 0 a 10 cm. Los suelos fueron secados al aire y luego pasados a través de tamices con tamaños de 2, 1 y 0,5 mm de diámetro para obtener así, 10 Kg de agregados para cada uno de los siguientes tamaños: 2 – 1; 1 – 0,5 y < 0,5 mm de diámetro promedio. En total, se obtuvieron 150 Kg de agregados de suelo para las cinco unidades, los cuales fueron empacados en botellas plásticas y transportados al Laboratorio de Física de Suelos de la Universidad del Estado de Ohio, en Columbus Ohio, Estados Unidos, para la determinación de la erodabilidad. En la determinación de la erodabilidad de los suelos, se usó un simulador de lluvias Tipo Purdue Programable, con Boquilla Vee – Jet 80 – 100, bajo condiciones de laboratorio.

- Preparación de las muestras de suelos para ser sometidas al impacto de la lluvia usando el simulador de lluvias.

Las muestras previamente tamizadas, fueron empacadas manualmente en bandejas metálicas de 20,32 cm de ancho por 40,64 cm de longitud (0,08258 m²).

Antes de depositar la muestra de suelo en la bandeja, se colocaron en su orden los siguientes elementos, siguiendo la metodología propuesta por Truman y Bradford (1995):

Anjeo y gasa, arena lavada para que actúe como filtro (3 cm de espesor), la muestra de suelo distribuido uniformemente en la bandeja (2 cm de espesor).

Con el fin de conservar en la bandeja una condición similar a la de campo, se procedió a utilizar el valor de la Densidad aparente (Da) promedio de cada suelo, para calcular la cantidad de este que ocuparían los dos centímetros de espesor en la bandeja. Para ello se aplicó la siguiente ecuación:

$$Da = P/V$$

Donde:

Da = Densidad aparente del suelo en g cm⁻³

P = Peso en g de Suelo Seco en estufa a 105 °C por 24 horas o hasta tener valor de peso constante.

V = Volumen en cm³

La cantidad de suelo seco al aire que se deposita en la bandeja, es corregida previamente, con base en peso de suelo seco a la estufa a 105 °C por 24 horas.

Las muestras de suelo previamente distribuidas en las bandejas, fueron sometidas a saturación por capilaridad en agua deionizada, durante un período de 24 horas.

Luego de la Saturación, las muestras de suelos fueron drenadas por espacio de una hora, hasta lograr la condición de capacidad de campo y finalmente colocadas en un soporte, con una inclinación del 70% (pendiente más representativa de los suelos de la Zona Cafetera Colombiana).

Alrededor de la bandeja, se coloca un protector metálico de 54 cm de altura, denominado guarda salpique, para evitar pérdidas de suelo por dispersión de agregados como consecuencia del impacto de las lluvias sobre el suelo.

Finalmente, las muestras quedan listas para ser sometidas al impacto de la lluvia durante una hora, con agua deionizada, proveniente del simulador de lluvias previamente calibrado bajo condiciones de laboratorio,

Calibración del Simulador de lluvias. El simulador de lluvias, fue calibrado a una intensidad de 100 mm h⁻¹, equivalente a una energía cinética de 0,002936 J cm⁻².mm de lluvia, durante una hora. Esta intensidad de

lluvias es representativa para la Zona Cafetera Colombiana, como causante de mayor erosión (Kogson, 1988; Rivera, 1990).

Etapas de la calibración del simulador de lluvias:

- Determinar la ubicación de las bandejas, con el criterio de seleccionar los sitios donde se concentra la cantidad mayor de agua.
- Calcular la presión y el número de oscilaciones de las boquillas hasta conseguir la intensidad crítica de la lluvia representativa de la Zona Cafetera Colombiana (100 mm h^{-1})

Determinación de la distribución del flujo de aguas en cada uno de los suelos estudiados. Se determinó la distribución del flujo de aguas por escorrentía y percolación en cada una de las muestras de las diferentes unidades de suelos, a intervalos de cinco minutos durante una hora.

Determinación de la lluvia efectiva

La lluvia efectiva se refiere a la cantidad de agua que cae dentro de la bandeja porta muestra de suelo: Para ello, se hace necesario conocer el área de la bandeja que porta la muestra de suelo:

- Área de la bandeja porta muestra de suelo = $40,64 \text{ cm} \times 20,32 \text{ cm} = 0,08258 \text{ m}^2$.
Volumen de Lluvia efectiva en la bandeja = $98,68 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \times 0,08258 \text{ m}^2 = 8,15 \text{ L h}^{-1}$

Lluvia efectiva en lámina (cm h^{-1}) = $8,15 \text{ L h}^{-1} / 0,08258 \text{ m}^2 = 8149 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1} / (0,08258 \text{ m}^2 \times 10000 \text{ cm}^2/\text{m}^2) = 9,90 \text{ cm h}^{-1}$

Este valor es necesario para hacer los balances de agua en relación con las aguas de escorrentía, percolación y agua almacenada en el suelo.

- **Procesamiento de los datos para las aguas de escorrentía, percolación y agua almacenada en el suelo.**

Cada aguacero artificial hecho con el simulador de lluvias, tiene una duración de una hora. Se hicieron dos repeticiones para cada tamaño de agregados de suelo. Las aguas de escorrentía y percolación, provenientes de las muestras de suelo sometidas al aguacero, son medidas en probetas, en cm^3 cada cinco minutos. Estos valores se promedian y se les hace la conversión de unidades a cm h^{-1} , Así: Para el caso de la Unidad Guamal, en la muestra con agregados 2-1 mm de diámetro, en los primeros cinco minutos de iniciada la lluvia, se tuvo un valor de 40 cm^3 y es necesario convertirlos a cm h^{-1} , así: $40 \text{ cm}^3 / \text{Área de la Bandeja portamuestra}$, donde $40 \text{ cm}^3 / 0,08258 \text{ m}^2 = 484,4 \text{ cm}^3/\text{m}^2 = 484,4 \text{ cm}^3 / 10,000 \text{ cm}^2 = 0,0484 \text{ cm}^3 / 5 \text{ min}$. Como el valor se da en cm h^{-1} , entonces $0,0484 \times 12 = 0,58 \text{ cm h}^{-1}$. Este mismo cálculo se hace para cada intervalo de cinco minutos.

El agua almacenada en el suelo, se determina mediante la diferencia entre la lluvia efectiva en la bandeja porta muestra (cm h^{-1}) menos las aguas de escorrentía y percolación

Determinación de los procesos en pérdidas de suelo por erosión.

- **Pérdidas de suelo por escorrentía.**

Se determinaron las pérdidas de suelo en las aguas de escorrentía cada cinco minutos durante una hora. Las muestras se recogieron y se midieron en probetas las cuales, se dejaron decantar por 48 horas y luego de sacar el agua superficial, las muestras de suelo fueron llevadas a la estufa a 105°C por 24 horas, para tener suelo seco.

- **Pérdidas de suelo por percolación.**

Se determinaron las pérdidas de suelo por percolación cada cinco minutos durante una hora. Las aguas percoladas se recogieron y midieron en probetas, se dejaron decantar por 48 horas y luego el suelo decantado, fue llevado a la estufa a 105°C por 24 horas, para tener muestras de suelo seco.

- **Pérdidas de suelo por salpique o dispersión de agregados.**

Se determinaron las pérdidas de suelo por salpique de los agregados debido al impacto de la lluvia durante una hora. Las muestras se recogieron en un balde, al igual que el suelo adherido a las paredes de la lamina que bordea la bandeja (lamina guarda salpique) y el que se presenta en los canales laterales que bordean la bandeja. Las muestras se dejaron decantar por 48 horas y luego fueron llevadas a la estufa a 105°C por 24 horas, para tener muestras de suelo seco.

- **Pérdidas de suelo depositado en el canal de escorrentía.**

Se determinaron las pérdidas de suelo depositado en el canal de escorrentía durante una hora de lluvia. Esta pérdida se refiere al material que no fue arrastrado del canal por el agua de escorrentía. Este canal se encuentra localizado al final de la bandeja portamuestra de suelo. Las muestras fueron llevadas a la estufa a 105°C por 24 horas, para tener muestras de suelo seco.

Determinación de los índices de erodabilidad K de la ecuación universal de erosión (USLE) y K_i del proyecto de predicción de erosión por el agua (WEPP).

Determinación del índice de erodabilidad (K) de la Ecuación Universal de Erosión (USLE)

Se hizo mediante la metodología propuesta por Wischmeier y Smith (1978), con base en la erosividad de las lluvias (R) y la pérdida de suelo por erosión (A) en Mg ha⁻¹, obtenida en las bandejas de escorrentía, expuesta a la lluvia. Según Hudson (1982), la erosión potencial de un suelo, es igual a la erosividad por la erodabilidad, considerando los demás factores de la Ecuación Universal de Erosión iguales a 1 que es su valor máximo.

$$A = R \times K$$

Donde:

A = Pérdida del suelo en t ha⁻¹.año⁻¹

R = Índice de erosividad de las lluvias (medida de la agresividad de la energía de las lluvias para ocasionar erosión), en MJ.mm ha⁻¹.h⁻¹.año⁻¹.

K = Índice de erodabilidad del suelo (susceptibilidad del suelo a la erosión), en t.ha.h MJ⁻¹.mm⁻¹.ha⁻¹.

Donde:

$$R = EI_{30}$$

E = Energía cinética de la lluvia (Mj ha⁻¹.) (Foster *et al* ., 1981) De donde:

$$e = 0,119 + 0,0873 \log_{10} (Im). \text{ Donde } Im = \text{Intensidad de la lluvia en mm h}^{-1}$$

$$e = \text{energía de la lluvia por unidad de lluvia} = \text{Mj.ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$$

$$e = 0,119 + 0,0873 \log_{10} 98,4 \text{ mmh}^{-1} = 0,2929 \text{ Mj.ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$$

La energía cinética obtenida (0,2929 Mj.ha⁻¹mm⁻¹), se multiplica por la precipitación total del aguacero expresado en mm (98,4 mm), así:

$0,2929 \text{ Mj} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \times 98,4 \text{ mm} = 28,821 \text{ Mj ha}^{-1}$, que corresponde a la energía cinética del aguacero (E).

El valor anterior se multiplica por I_{30} en mm h^{-1} del aguacero = Intensidad de la lluvia en 30 minutos
 $= 49,2 \text{ mm}/30 \text{ min}$. $I_{30} \text{ mm h}^{-1} = 49,2 \times 2 = 98,4 \text{ mm h}^{-1} \cong 100 \text{ mm h}^{-1}$.

Entonces:

EI_{30} = Erosividad del aguacero = R

$$EI_{30} = 28,821 \text{ Mj ha}^{-1} \times 98,4 \text{ mm h}^{-1} = 2836,878 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} = R$$

$$K = A/R$$

De donde:

A = Pérdida del suelo en $\text{Mg ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, para el caso de un aguacero en 60 minutos.

A = Pérdida de suelo por escorrentía + Pérdida de suelo por Salpique + Pérdida de suelo depositado en el canal de escorrentía.

Determinación del Factor Erodabilidad entre surcos (K_i) del Proyecto de Predicción de Erosión por el Agua (WEPP).

K_i o erodabilidad entre surcos del WEPP (Proyecto de Predicción de Erosión por el Agua) (Elliot *et al* , 1989; Lal, 1994a; Bajracharya *et al* , 1992; Bruce y Lal, 1975), se determinó con base en la siguiente ecuación:

$$D_i = K_i I^2 S_f$$

Donde:

D_i = Pérdidas de suelo entre surcos ($\text{kg m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Se suman todas las pérdidas de suelo (Pérdidas de suelo por Escorrentía + Pérdidas de Suelo por salpique + Suelo acumulado en el canal de Escorrentía), a excepción de las pérdidas de suelo por percolación. El total, se divide por el tiempo del aguacero en segundos, así:

K_i = Erodabilidad entre surcos (kg s m^{-4})

I = Intensidad de la lluvia (m s^{-1})= $98,4 \text{ mm} = 98,4 \text{ L m}^{-2} = (98,4 \times 1000 \text{ cm}^3)/10000 \text{ cm}^2 = 9,84 \text{ cm h}^{-1} = 0,0984 \text{ m h}^{-1} = 0,0984 \text{ m}/3600\text{s} = 2,73 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$

$$I^2 = (2,73 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}) = 7,45 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$$

Pendiente para la bandeja en porcentaje = 70%

Conversión de la pendiente de la bandeja de porcentaje a grados: $\text{Tangente } 70/100 = 0,7$ De donde:

$$\text{Tangente}^{-1} 0,7 = 35^\circ$$

Se utilizó esta pendiente, por ser la más representativa de la mayoría de los suelos de la Zona Cafetera Colombiana.

Factor pendiente, $S_f = 1,05 - (0,85(\text{EXP}(-4 \text{ sen}(35^\circ)))) = 0,96429$

Determinaciones Físicas y Químicas de los suelos en la profundidad de 0 – 10 cm

Se hicieron varias determinaciones que permiten mediante correlaciones, determinar su influencia en relación con los factores erodabilidad de los suelos K y K_i de la USLE y WEPP respectivamente:

Determinaciones físicas:

- Determinaciones mecánicas:

- **Determinación de la granulometría:** Se determinaron los porcentajes de: arena, limo y arcilla, por el método del hidrómetro propuesto por Bouyoucos (1927).

- Determinaciones volumétricas

- **Contenido de humedad disponible.** Se determinó usando muestras de suelos disturbados. Para ello se usaron cilindros de hierro galvanizado de 5 cm de diámetro interno por 1 cm de alto. La cantidad de suelo depositada en los cilindros, se calculó con base en la densidad aparente de cada suelo. Para la determinación del agua disponible, fue necesario obtener el contenido de humedad de cada unidad de suelo a 0,033 MPa y 1,5 MPa.

- Determinaciones químicas

- Contenido de materia orgánica: Se hizo para cada uno de los tamaños de agregados del suelo (2-1, 1-0,5 y < 0,5 mm de diámetro promedio) por el método de Walkley y Black (1934), con dicromato de potasio.

- pH

- K, Ca, Mg, P, Fe, Mn, Zn, Cu, Al. El Fe, Mn y Al, fueron extraídos en oxalato, pirofosfato y ditionito de Na – citrato.

- Capacidad de Intercambio Cationico.

Materiales y métodos de la fase II

Obtenidos los resultados de la fase I se procedió a hacer determinaciones de campo y laboratorio para obtener nuevas propiedades físicas y químicas a diferentes profundidades en el perfil del suelo, para luego ser correlacionadas con la erodabilidad.

Muestreo en campo para determinación de propiedades físicas y químicas de los suelos en tres usos (bosque, café y pastos) y cuatro profundidades (0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm):

Se hicieron varias determinaciones físicas y químicas a diferentes profundidades en el perfil del suelo, que permiten, mediante correlaciones determinar la influencia de cada una de ellas con el factor erodabilidad de los suelos K , de la Ecuación Universal de Erosión y K_i del WEPP:

- Toma de muestras de suelo en tres usos diferentes para cada unidad:

- Bosque
- Cultivo de Café
- Cultivo en pastos (potrero)

Las muestras de suelos se tomaron a cuatro profundidades (cm):

- 0 – 10
- 10 – 20
- 20 – 40
- 40 - 60

Tamaño de muestra: Cinco repeticiones por uso del suelo, para cada profundidad.

Determinaciones físicas

- Determinaciones en campo:

- **Resistencia a la penetración del suelo:** Se utilizó un Penetrógrafo estático, Marca SPAD, con el fin de medir la fuerza por unidad de área seccional (kg m^{-2}) (esfuerzo), necesaria para introducir un Pistón lentamente hasta cierta profundidad en el suelo. Las pruebas se hicieron en condición de campo. Se efectuaron 25 repeticiones para cada uso del suelo (bosque, café y pasto) en total 75 determinaciones por unidad de suelo, equivalentes a 375 repeticiones para las cinco unidades de suelo estudiadas. Se determinó la humedad gravimétrica para cada sitio de muestreo, con cinco repeticiones.

- **Resistencia al cortante tangencial del suelo:** Se usó un aparato de torsión con cuchillas, el cual según Forsythe (1975), tiene la ventaja de poder medir la resistencia al cortante tangencial del suelo directamente en el campo. Para las determinaciones se usó un equipo, Marca EDECO PILCON. Las pruebas se hicieron en condición de campo a dos profundidades (0 a 10 y 10 a 20 cm de profundidad). Se efectuaron 50 repeticiones por cada uso del suelo (bosque, café y pasto) en total 150 determinaciones por unidad de suelo, equivalentes a 750 repeticiones para las cinco unidades de suelos estudiadas. Se determinó la humedad gravimétrica para cada sitio de muestreo, con cinco repeticiones.

Determinaciones en laboratorio:

- Propiedades mecánicas:

- **Determinación de la granulometría:** Se hizo por el método del hidrómetro propuesto por Bouyoucos (1927):

- Porcentaje de Arenas
- Porcentaje de Limos
- Porcentaje de Arcillas

- **Distribución del tamaño de arenas:** Se separaron las arenas de los agregados del suelo para cada diámetro de tamiz (> 2 mm, 2 a 1 mm, 1 a 0,5 mm, 0,5 a 0,25 mm y de 0,25 a 0,10 mm de diámetro promedio) utilizado en la determinación de la estabilidad estructural por el método de Yoder. La determinación, se efectuó para dos profundidades (0-10 y 10 a 20 cm). Para cada profundidad se efectuaron 25 repeticiones, es decir 50 repeticiones por uso del suelo, equivalentes a 150 repeticiones por Unidad de suelo y a 750 repeticiones para las cinco unidades de suelos estudiadas. Para la obtención de las arenas, fue necesario destruir los agregados con pirofosfato de sodio al 8 % y en caso de no lograrse la destrucción completa de los mismos por este método, se utilizó el sistema de ultrasonido por un tiempo de dos minutos. Obtenidas las arenas, para cada tamaño de tamiz, se procedió a pasarlas por el resto de los tamices ya reportados, para obtener los tamaños diferentes (Amézquita, 1998*).

- **Distribución de agregados en seco (Seco al aire):** El muestreo se hizo en cinco sitios por uso del suelo y a cuatro profundidades del perfil: 0- 10, 10 – 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm. En cada profundidad se tomaron 5 muestras (repeticiones), es decir 5 x 4 (profundidades) x 3 (usos) x 5 (suelos) = 300 muestras para las cinco Unidades de suelos estudiadas. Para cada una de las 300 muestras se tomaron submuestras de 200 g de suelo seco al aire, las cuales se pasaron por un juego de tamices de:

- 6,35 – 4,75 mm
- 4,75 – 2,0
- 2,0 – 1,0
- 1,0 – 0,5
- 0,5 – 0,25
- 0,25 – 0,125

* Comunicación personal de Doctor Edgar Amézquita Collazos, Unidad de Suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Email: Amezquita@cgiar.org Enero de 1998.

- < 0,125

El juego de tamices fue sometido a vibración en un equipo vibrador de tamices a 500 revoluciones por minuto, durante cinco minutos. Se hicieron cinco repeticiones de distribución de agregados en seco por muestra de suelo, equivalente a 1500 repeticiones para las cinco unidades de suelos estudiadas.

El tamaño de agregados resultante entre los tamices 4,75 – 2,0 mm fueron utilizados para la determinación de la estabilidad de agregados por el método de Yoder

- **Determinación de la estabilidad de agregados en húmedo (Método de Yoder)**

Se efectuó por el método de Yoder, modificado por Amézquita*. La determinación de las muestras se hizo a dos profundidades del perfil del suelo: 0- 10 y 10 – 20 cm. Para cada profundidad se efectuaron 25 repeticiones, es decir 50 repeticiones por uso del suelo, equivalentes a 150 repeticiones por Unidad de suelo y a 750 repeticiones para las cinco unidades de suelos estudiadas.

Para cada repetición se usaron 20 g de suelo seco al aire.

A partir de los valores de estabilidad de agregados en húmedo, se calcularon los siguientes índices, siguiendo la metodología propuesta por González, 1983:

$$\text{Indice de estructura (IE)} = \frac{X_2 + X_3 + X_4}{X_1 + X_5}$$

Donde:

X1 = Agregados estables > 2 mm de diámetro promedio
 X2 = Agregados estables 2 – 1 mm de diámetro promedio
 X3 = Agregados estables entre 1 – 0,5 mm de diámetro promedio
 X4 = Agregados estables entre 0,5 – 0,25 mm de diámetro promedio
 X5 = Agregados estables < 0,25 mm de diámetro promedio

$$\text{Peso diámetro promedio (PDP)} = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i$$

Donde:

X_i = Diámetro promedio de cada fracción
 W_i = Proporción de la muestra total que se encuentra en cada tamiz

$$\text{Estabilidad de la agregación (EA)} = \frac{\text{Peso de agregados } > 0,25 \text{ mm de diámetro promedio.}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

- **Propiedades volumétricas:**

- **Porosidad total (Pt):** Para esta determinación se siguió la metodología citada por Forsythe (1975). Se tomaron muestras de cinco suelos, tres usos de los mismos y cuatro profundidades. Se efectuaron cinco repeticiones por cada profundidad de muestreo (0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm), equivalente a 20 repeticiones por uso del suelo (bosque, café y pastos), 60 repeticiones por unidad de suelo y 300 para las cinco unidades de suelos estudiadas. Se aplicó la ecuación propuesta por Forsythe (1975).

- **Densidad aparente (Da):** Se determinó por el método del cilindro propuesto por Coile (1936) citado por Montenegro y Malagón (1990). Para la toma de muestras, se hicieron calicatas escalonadas para cada

profundidad (0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm), con el fin de evitar compactar las muestras. Se recolectaron muestras de suelo sin disturbar a capacidad de campo, mediante el uso de cilindros de hierro galvanizado de 10 cm de alto, por 10 cm de diámetro interno. Las muestras dentro del cilindro se protegieron con bolsas de polietileno selladas con cinta para enmascarar, para evitar pérdidas de humedad y para conservarlas sin disturbar durante su transporte. Se efectuaron cinco repeticiones por cada profundidad de muestreo, equivalente a 20 repeticiones por uso del suelo (bosque, café y pastos), 60 repeticiones por unidad de suelo y 300 para las cinco unidades de suelo estudiadas. Las muestras se secaron en estufa a 105 °C durante 24 horas, hasta alcanzar un valor de peso constante, y obtener así, la Da por el método convencional (peso gravimétrico seco y volumen de suelos sin disturbar).

- Densidad de partícula o densidad real (Dr): Se determinó siguiendo el método del picnómetro, descrito por Montenegro y Malagón (1990). Se utilizó una bomba de vacío a dos atmósferas de presión por espacio de dos horas, para eliminar en forma total, las burbujas presentes en las muestras de suelo dentro del picnómetro. Se efectuaron cinco repeticiones por cada profundidad de muestreo (0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm), equivalente a 20 repeticiones por uso del suelo (bosque, café y pastos) 60 repeticiones por unidad de suelo y 300 para las cinco unidades de suelos estudiadas.

- Porosidad de aeración o espacio poroso lleno de aire (Ea): Para esta determinación se siguió la metodología citada por Gavande (1986). Se tomaron muestras de cinco suelos, tres usos de los mismos y cuatro profundidades. Se efectuaron cinco repeticiones por cada profundidad de muestreo (0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm), equivalente a 20 repeticiones por uso del suelo (bosque, café y pastos), 60 repeticiones por unidad de suelo y 300 para las cinco unidades de suelos estudiadas.

- Humedad gravimétrica (hg): : Para esta determinación se siguió la metodología citada por Forsythe (1975). Se tomaron muestras de cinco suelos, tres usos de los mismos y cuatro profundidades. Se efectuaron cinco repeticiones por cada profundidad de muestreo (0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm), equivalente a 20 repeticiones por uso del suelo (bosque, café y pastos), 60 repeticiones por unidad de suelo y 300 para las cinco unidades de suelos estudiadas. Las muestras se transportaron en bolsas plásticas herméticamente cerradas, para evitar pérdidas de agua. El secado a la estufa se hizo a 105 °C por 24 horas.

- Humedad volumétrica de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana (HV): Para esta determinación se siguió la metodología citada por Forsythe (1975). Se tomaron muestras de cinco suelos, tres usos de los mismos y cuatro profundidades. Se efectuaron cinco repeticiones por cada profundidad de muestreo (0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm), equivalente a 20 repeticiones por uso del suelo (bosque, café y pastos), 60 repeticiones por unidad de suelo y 300 para las cinco unidades de suelos estudiadas. Las muestras se trasladaron en bolsas plásticas herméticamente cerradas, para evitar pérdidas de agua. El secado a la estufa se hizo a 105 °C por 24 horas.

- Retención de humedad del suelo. Se determinó la retención de humedad a 0,033, 0,1, 0,5, 1,0 y 1,5 Megapascales (MPa), para cada una de las cinco unidades de suelos. Se recolectaron muestras de suelo sin disturbar a capacidad de campo, mediante el uso de cilindros de hierro galvanizado de 1 cm de alto, por 5 cm de diámetro interno. Para la toma de muestras, se hicieron calicatas escalonadas para cada profundidad (0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm), con el fin de evitar compactar las muestras de suelo. Las muestras dentro del cilindro se protegieron con bolsas de polietileno selladas con cinta para enmascarar, para evitar pérdidas de humedad y para conservarlas sin disturbar durante su transporte. Se efectuaron cinco repeticiones por cada profundidad de muestreo, equivalente a 20 repeticiones por uso del suelo (bosque, café y pastos), 60 repeticiones por unidad de suelo y 300 para las cinco unidades de suelo estudiadas.

- Propiedades de conducción de humedad:

- Permeabilidad: Se recolectaron muestras de suelo sin disturbar a capacidad de campo, mediante el uso de cilindros de hierro galvanizado de 10 cm de alto, por 10 cm de diámetro interno. Para la toma de muestras, se hicieron calicatas escalonadas para cada profundidad (0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 y 40 a 60 cm), con el fin de evitar al máximo compactar la muestra de suelo. Las muestras dentro del cilindro se protegieron con bolsas de polietileno selladas con cinta para enmascarar, para evitar pérdidas de humedad y conservarlas sin disturbar durante su transporte. Se efectuaron cinco repeticiones por cada profundidad de muestreo,

equivalente a 20 repeticiones por uso del suelo (bosque, café y pastos), 60 repeticiones por unidad de suelo y 300 para las cinco unidades de suelos estudiadas. La permeabilidad se determinó mediante el Permeámetro de carga constante. La construcción del Permeámetro, la preparación y montaje de las muestras se hizo según la metodología descrita por Cordero (1974). El valor de la permeabilidad se clasifica con base en las escalas propuestas por Anaya *et al.* (1977), O-Neal (1949) citado por Lal (1990) y Smith y Browning (1946) citados por Lal (1990).

- Determinaciones químicas de 0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad

Se hicieron las siguientes determinaciones químicas:

- Materia orgánica (M. O.) en porcentaje: Se hizo por el método de Walkley y Black (1934) (dicromato de potasio).

- pH, K, Ca, Mg, P, Fe, Mn, Zn, Cu, Al. Las determinaciones de Fe, Mn y Al. Se hicieron por diferentes métodos de extracción: ditionito de sodio, citrato, oxalato y en pirofosfato. La Capacidad de intercambio catiónico se efectuó por el método del acetato de amonio.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA ÍNDICES DE ERODABILIDAD (K) DE LOS SUELOS ESTUDIADOS Y PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS MISMOS.

Mediante el uso del programa SAS, 1993, se efectuaron los siguientes análisis estadísticos:

Análisis de regresión para la distribución del flujo de agua por escorrentía, percolación, pérdidas de suelo por flujo de agua por escorrentía, pérdidas de suelo por flujo de agua por Percolación y pérdidas de suelo por dispersión de cada tamaño de agregados de las cinco unidades de suelos estudiadas.

Correlación lineal simple (r) y de determinación (R^2) entre los índices de erodabilidad K_i del WEPP y K de la USLE y propiedades físicas y químicas de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana (0 a 10 cm de profundidad en el perfil).

Correlación lineal simple (r) y de determinación (R^2) entre los índices de erodabilidad K_i del WEPP y K de la USLE y propiedades fisicoquímicas de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana (0 a 60 cm de profundidad en el perfil).

Análisis de regresión para la determinación de ecuaciones para la predicción de la erodabilidad K_i del WEPP y K de la USLE de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana.

Coefficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación (R^2), con su respectivo valor de significancia, entre propiedades físicas y químicas en la profundidad 0 a 10 cm dentro del perfil de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana

Coefficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación (R^2), con su respectivo valor de significancia, entre propiedades fisicoquímicas, en la profundidad 0 a 60 cm dentro del perfil de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Distribución del flujo de agua por Escorrentía y Percolación.

En la **Tabla 2**, se presenta la distribución del flujo de agua en cinco Unidades de suelos de la Zona Cafetera Colombiana, Tres de ellos (Chinchiná, Montenegro y Fresno) derivados de cenizas volcánicas (*Melanudands*) y las dos unidades de suelos restantes (Guamal y Parnaso) (*Typic eutropepts*), derivados de areniscas olivínicas y basaltos respectivamente (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1982a, 1986). En los

suelos derivados de cenizas volcánicas, *Melanudands* y en la Unidad Parnaso, *Typic eutropepts* predomina el flujo de agua por percolación. El flujo por percolación más alto, se encuentra en la Unidad Chinchiná, con valores de 104, 106 y 103 cm/h para los tamaños de agregados de 1-2, 0.5-1 y <0.5 mm, respectivamente (Tabla 2), equivalentes al 88, 90 y 87% para cada tamaño de agregados en su orden. El flujo por percolación más bajo, se encuentra en la Unidad Guamal, *Typic eutropepts*, con valores de 39,6, 39,7 y 17,6 cm/h, para los tamaños de agregados de 1-2, 0.5-1 y <0.5 mm de diámetro promedio, respectivamente (Tabla 2), equivalente al 33,5, 33,6 y 14,9%, para cada tamaño de agregados en su orden.

Tabla 2. Distribución del flujo de agua (cm/h) en cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana.

UNIDAD DE SUELO	FLUJO DE ESCORRENTÍA			FLUJO DE PERCOLACION		
	Tamaño de agregados de suelo (mm)					
	1-2	0.5-1	< 0.5	1-2	0.5-1	< 0.5
Chinchina (<i>Melanudands</i>)	6,69	6,76	9,53	104,13	106,42	103,02
Montenegro (<i>Melanudands</i>)	19,72	20,29	22,7	89,24	88,91	76,82
Fresno (<i>Melanudands</i>)	8,98	8,25	13,27	99,55	98,78	99,61
Guamal (<i>Typic Eutropepts</i>)	64,76	68,49	87,97	39,63	39,67	17,65
Parnaso (<i>Typic Eutropepts</i>)	7,03	6,68	47,76	102,9	103,03	55,29

Todos los suelos presentan la tendencia a incrementar el flujo por Escorrentía y a disminuir el flujo por Percolación, cuando el tamaño de agregados del suelo disminuye de 2 mm a < 0,5 mm.

En los suelos derivados de cenizas volcánicas, *Melanudands*, durante los primeros 10 minutos, tanto el flujo por escorrentía como por percolación son altos. Después de este tiempo ambos flujos se tornan constantes, pero la percolación, siempre permanece mayor que la escorrentía, favorecida por los contenidos altos de materia orgánica (12 a 18%) y presencia alta de arena dentro del perfil (**Tabla 3**), permeabilidad moderada y densidad aparente baja, que los convierte en suelos de condiciones físicas buenas (Rivera, 1990). Estas condiciones, son favorables para los suelos de Zona Cafetera, en el sentido que contrarrestan los procesos de erosión debido a la escorrentía como consecuencia de lluvias con intensidades altas, pendientes fuertes y longitudes largas que presentan estos suelos.

La unidad Guamal tiene un comportamiento contrario a las demás Unidades de suelos en cuanto al flujo de agua por escorrentía y percolación. Durante los primeros 10 minutos, tanto el flujo por escorrentía, como por percolación, crecen rápidamente, pero a partir de estos 10 minutos, el flujo por percolación disminuye y el flujo por escorrentía, se incrementa. Lo anterior se debe a las propiedades físicas desfavorables que presenta la Unidad Guamal, tales como contenido de materia orgánica bajo (**Tabla 3**), estabilidad estructural baja, permeabilidad baja, contenido de arcilla y densidad aparente altos (Rivera, 1990). Estas condiciones físicas desfavorables, además de las pendientes fuertes y longitudes largas de estos suelos (**Tabla 3**), favorecen los procesos de flujo de agua por escorrentía y el almacenamiento bajo de esta en el perfil del suelo, ocasionando déficit hídrico en los períodos secos.

La Unidad Parnaso, *Typic eutropepts*, presenta un flujo de agua por escorrentía y percolación, de tipo intermedio comparado con los suelos de cenizas volcánicas y la Unidad Guamal, favorecida por su material de origen (Basalto) y el contenido de materia orgánica mayor que en la Unidad Guamal (**Tabla 3**).

- Análisis Estadísticos de la Distribución del flujo de agua por Escorrentía

En un análisis de regresión para la distribución del flujo de agua por escorrentía, se observó, que los Coeficientes de Variación (CV), son bajos para las cinco Unidades de suelo, al igual que para los diferentes tamaños de agregados, con valores que oscilaron desde 22,45 a 3,8 para las Unidades de suelo Guamal y Fresno respectivamente, con tamaños de agregados de 0,5-1 y < 0,5mm en su orden. Entre más pequeño el tamaño de los agregados de suelo, así mismo hay la tendencia a disminuir el coeficiente de variación.

Se determinaron, además, las correlaciones lineales simples entre el flujo de agua por escorrentía en relación con el tiempo de aplicación del aguacero con intervalos de cinco minutos y se observó como a medida que se reduce el tamaño de los agregados de suelo, así mismo, se mejoran las correlaciones. La mejor correlación se

presentó para la Unidad Fresno, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,95$, seguido por la Unidad Montenegro, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,89$ para los tamaños de agregados $< 0,5$ mm de diámetro. Se observó como en la Unidad Guamal, el flujo de agua por escorrentía a través del tiempo, es muy alto comparado con las demás Unidades de suelos, con coeficientes de determinación $R^2 = 0,89, 0,72$ y $0,61$, para los tamaños de agregados 1-2, 0,5-1 y $< 0,5$ mm de diámetro respectivamente.

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas de cinco suelos de la zona cafetera colombiana

UNIDAD DE SUELO	M.O.	pH	K	Ca	Mg	CIC	P	Fe	Mn	Zn	Cu	Al	Partículas			Textura	Agua
	(%)		m.eq./100g de suelo					p.p.m.				Ar L A (%) (%) (%)				(%)	
Chinchiná (<i>Melanudands</i>)	14	4,8	0,7	2,2	1,2	32	28	179	30	7	13	13	26	25	49	FArA	44
Montenegro (<i>Melanudands</i>)	12	5	0,6	5,6	1,4	26	17	147	27	10	2	12	28	26	46	FArA	26
Fresno (<i>Melanudands</i>)	18	4,9	0,4	2,6	1	34	2	178	16	1	5	19	24	30	46	F	9
Guamal (<i>Typic Eutropepts</i>)	3,9	5	0,8	4,4	3,2	13	24	240	84	4	3	2,9	42	24	34	Ar	10
Parnaso (<i>Typic Eutropepts</i>)	7,6	4,5	3	5	5,4	23	9	212	170	2	10	9,1	48	19	33	Ar	12

A medida que disminuye el diámetro de las agregados de suelo, de igual forma se incrementa el flujo por escorrentía, especialmente en las Unidades de suelo Guamal, Parnaso y Montenegro, con coeficientes de determinación $R^2 = 0,61, 0,82$ y $0,89$ respectivamente.

-Análisis Estadísticos de la Distribución del flujo de agua por Percolación.

En un análisis de regresión para la distribución del flujo de agua por Percolación, se observó, que los Coeficientes de Variación (CV), son bajos para las cinco Unidades de suelo, al igual que para los diferentes tamaños de agregados, con valores que oscilan desde 30,36 a 6,66, para las Unidades de suelo Guamal y Fresno respectivamente con tamaños de agregados de 1-2 y $< 0,5$ mm de diámetro promedio en su orden. Entre más pequeño el tamaño de los agregados de suelo, así mismo hay la tendencia a disminuir el coeficiente de variación.

Se determinaron, además, las correlaciones lineales simples entre el flujo de agua por Percolación en relación con el tiempo de aplicación del aguacero con intervalos de cinco minutos. La correlación mejor se presentó para la Unidad Fresno, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,58$, seguido por la Unidad Guamal, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,54$ para el tamaño de agregados 1-2 mm de diámetro. Se observó como en la Unidad Guamal, el flujo de agua por Percolación a través del tiempo, se torna negativo para el tamaño de agregados 1-2 mm y en los demás tamaños de agregados, se incrementa un poco, no obstante su tendencia a disminuir a través del tiempo, con coeficientes de determinación $R^2 = 0,54, 0,50$ y $0,20$ para los tamaños de agregados de 1-2, 0,5-1 y $< 0,5$ mm respectivamente. La Unidad Parnaso, tiene un comportamiento similar a la Guamal, cuando el tamaño de agregados es $< 0,5$ mm, donde el flujo por Percolación disminuye a través del tiempo, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,54$.

- DIFERENTES PROCESOS EN LAS PÉRDIDAS DE SUELOS POR EROSIÓN EN CINCO SUELOS DE LADERA DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA.

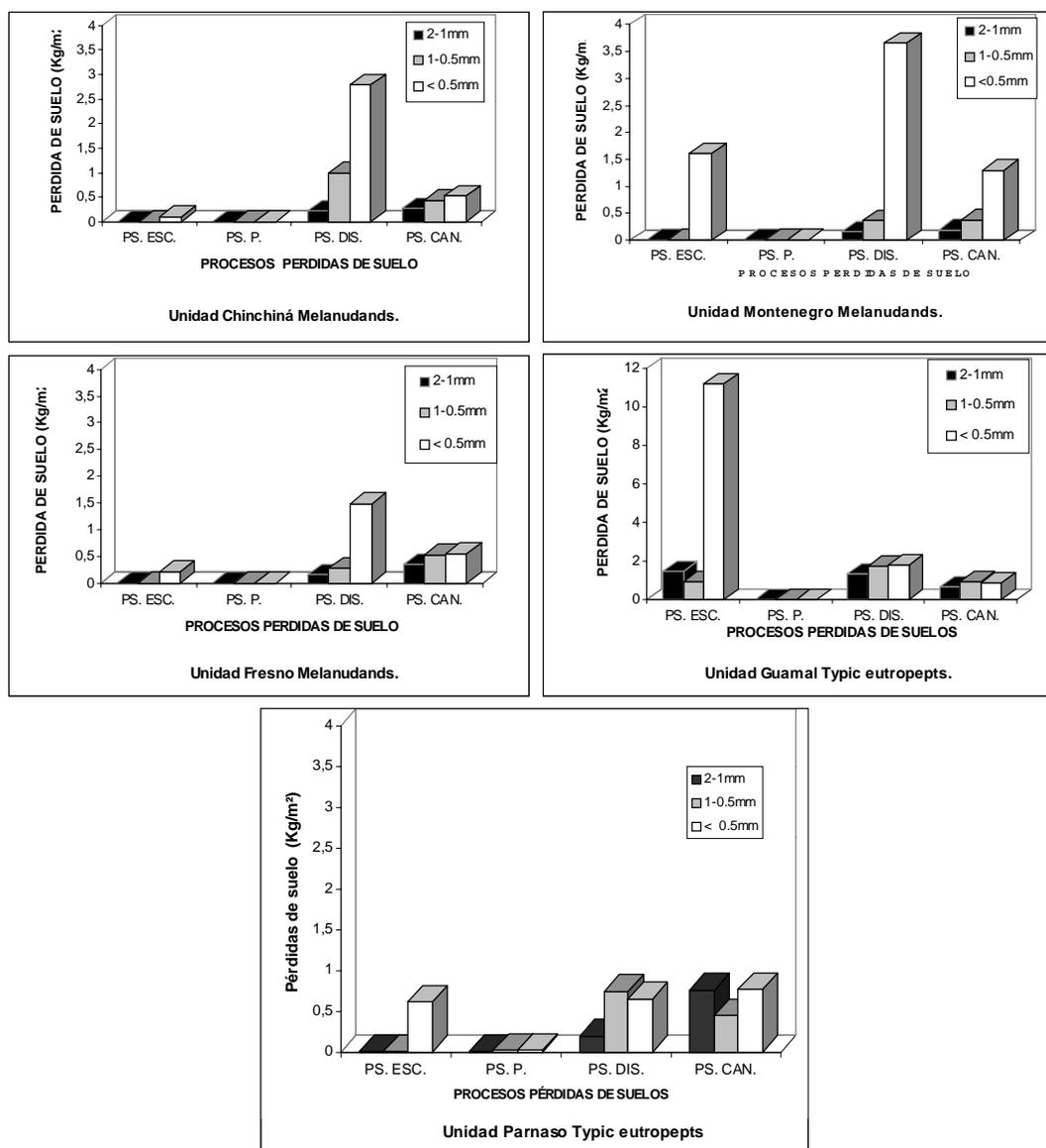
En la **Tabla 4 y Figura 1** se presentan para cada unidad de suelo cuatro tipos de procesos relacionados, con las pérdidas de suelos por erosión: Pérdidas de suelos por escorrentía, percolación, dispersión de agregados y suelo depositado en el canal de escorrentía.

- Pérdidas de suelo por escorrentía.

Tabla 4. Pérdidas de suelo por erosión (kg/m^2) en cinco suelos de ladera de la Zona Cafetera Colombiana frente a un simulador de lluvias (intensidad lluvia 100 mm/h)

UNIDAD SUELO	Pérdida suelo escorr.				Pérdida suelo percolac.*				Pérdida suelo dispersion				Pérdida suelo canal					
	Tamaño agregados suelo (mm)																	
	1-2	0,5-1	< 0,5	media	1-2	0,5-1	< 0,5	Media	1-2	0,5-1	< 0,5	media	1-2	0,5-1	< 0,5	media	Total	Total
CHINCHINA (Melanudands)	0,003	0,002	0,114	0,039	0,008	0,009	0,005	0,0073	0,218	0,996	2,787	1,333	0,272	0,432	0,525	0,409	5,349	1,78
MONTENEGRO (Melanudands)	0,004	0,004	1,607	0,538	0,01	0,009	0,009	0,0093	0,161	0,364	3,656	1,393	0,194	0,379	1,301	0,624	7,67	2,56
FRESNO (Melanudands)	0,001	0,001	0,218	0,073	0,007	0,008	0,007	0,0073	0,161	0,278	1,49	0,643	0,349	0,525	0,55	0,474	3,573	1,19
GUAMAL Typic eutropepts	1,467	0,985	11,2	4,550	0,018	0,012	0,0052	0,0117	1,391	1,748	1,822	1,653	0,701	0,987	0,924	0,870	21,225	7,07
PARNASO Typic eutropepts	0,001	0,001	0,61	0,204	0,006	0,019	0,02	0,015	0,195	0,743	0,65	0,529	0,752	0,445	0,76	0,652	4,157	1,39

* Las pérdidas de suelo por percolación, no se tienen en cuenta en los cálculos de las pérdidas de suelo por erosión totales y total promedio.



PS. ESC= Pérdidas de suelo por Escorrentía
 PS. P= Pérdidas de suelo por Percolación
 PS. DIS= Pérdidas de suelo por Dispersión de Agregados
 PS. CAN= Pérdidas de suelo en el Canal de Escorrentía

Figura 1. Procesos de perdidas de suelos de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana

Las pérdidas de suelo por escorrentía son muy bajas, para todos los suelos y tamaños de agregados, excepto para el tamaño de agregados <0,5 mm, para las Unidades de suelos Chinchiná Typic melanudans y Guamal, Typic eutropepts especialmente, con valores de pérdidas de suelo entre 0,114 Kg/m² (2,12%) y 11,2 Kg/m² (52,68%) respectivamente (**Tabla 4**).

Las pérdidas altas de suelo por erosión, como consecuencia de la escorrentía alta en la Unidad Guamal, indica así mismo, que los suelos de dicha Unidad, necesitan un uso, manejo y conservación adecuados, tales como, cultivos perennes que permitan regular las aguas de escorrentía y favorecer la infiltración, así como bosques de explotación regulada, con sotobosque; caña panelera; café bajo sombrío regulado, con manejo de coberturas nobles; explotación silvopastoril, con una ganadería alternada o de rotación, que evite el

sobrepastoreo y con ello la formación de calvas, surcos profundos, terracetos y cárcavas en el terreno. Este es uno de los problemas de erosión mayor en América Central y Sur América, según el World Resources Institute, 1992, citado por Herrick y Lal, 1995). Las prácticas más efectivas contra la erosión en suelos de la Unidad Guamal son, cubrimiento denso por coberturas de protección (coberturas nobles) (Rivera, 1994, 1997a, 1997b, 1999b.), las barreras vivas de limoncillo (*Cymbopogon citratus*), sembradas a través de la pendiente del terreno, acequias de ladera, totalmente cubiertas por una cobertura vegetal densa como pastos o maní forrajero (*Arachis pintoii*) que eviten el socavamiento de los taludes y el arrastre de suelo en el fondo del canal.

En los suelos de la Unidad Guamal, se debe evitar el uso del azadón y la maquinaria agrícola como sistemas de manejo, que conlleven a la remoción, alteración de la estructura natural y cambios en la distribución de los agregados naturales del suelo.

En los suelos volcánicos, *Melanudands*, tales como Montenegro, Chinchiná y Fresno, el uso de la maquinaria, puede romper los agregados y compactar los suelos. Según Young et al. (1985), debido a las operaciones de labranza, la densidad de los suelos es afectada y consecuentemente las características hidrológicas del suelo.

- Pérdidas de suelo por percolación.

Las pérdidas de suelo por percolación, son casi imperceptibles para los suelos estudiados, con valores promedio entre 0,01 kg/m² (0,41%) a 0,02 kg/m² (1,07%) para las unidades guamal y parnaso respectivamente (**Tabla 4**). Esto indica, que en los suelos estudiados, la erosión de tipo vertical o hacia lo profundo del perfil del suelo, no es un problema grave en Zona Cafetera, siendo necesario dirigir la atención a los otros tipos de procesos erosivos como la dispersión de agregados por el impacto de las lluvias y la escorrentía.

- Pérdidas de suelo por dispersión de agregados.

Este proceso es ocasionado por el impacto directo de la gota de lluvia al hacer contacto con el suelo totalmente desnudo. En el presente trabajo, estas pérdidas, están representadas por el suelo que es desplazado hacia las paredes que bordean la bandeja donde esta depositada la muestra de suelo que es expuesta al impacto de la lluvia con el simulador de lluvias.

Según Lal, 1988, citado por Bajracharya *et al*, 1992, la susceptibilidad de un suelo a las fuerzas erosivas por el impacto de las gotas de lluvia y por el flujo superficial, son generalmente considerados una propiedad inherente de los suelos, con un valor constante.

Este es el proceso de pérdida de suelo más importante, especialmente para los tres suelos derivados de cenizas Volcánicas *Melanudands* y la Unidad Parnaso, *Typic eutropepts* (**Figura 1**).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas, presentan valores promedio de pérdida de suelo por dispersión de agregados, entre 0,64 kg/m², equivalente al 53,66% de pérdida en relación con los demás procesos erosivos para el mismo suelo a 1,33 kg/m² equivalente al 74,49% de pérdida en relación con los demás procesos erosivos para el mismo suelo, para las Unidades de suelos Fresno y Chinchiná, *Melanudands*, respectivamente. Resultados similares reportan Young y Wiersma (1973), quienes observaron como al disminuir el impacto de la energía de la lluvia en un 89%, sin bajar su intensidad, las pérdidas de suelo por erosión, decrecieron en 90% o más, indicando como el impacto de la lluvia, es la fuerza que más influye en el arranque de los agregados de suelo. Así mismo, Watson et al. (1986), afirman que las pérdidas de suelo ocurridas entre los surcos formados luego de un aguacero, se deben principalmente al impacto de la gota de lluvia. Estos resultados permiten orientar al técnico en la toma de decisiones en relación con las prácticas preventivas de conservación de suelos y aguas, más eficientes, acordes con el proceso degradativo de mayor influencia. De esta manera, se evita inducir al agricultor en la realización de prácticas generalizadas, ineficientes y de costos altos. Por tanto, la recomendación más práctica para estos suelos, que permita contrarrestar la erosión causada por la dispersión de sus agregados, es el uso de una cobertura vegetal densa permanente sobre el suelo acompañando los cultivos (Manejo Integrado de Arvenses) (Rivera, 1994, 1997a, 1997b, 1999b), de tal forma que impidan el impacto directo de la gota de lluvia sobre el terreno. Esta práctica,

además de permitir proteger el suelo y el agua, obra como incentivo para el agricultor ya que le conduce a disminuir los costos en las desyerbas entre un 85 a 90% (Rivera, 1994).

La Unidad Parnaso, *Typic eutropepts*, presenta valores promedio de pérdidas de suelo por dispersión de agregados erosión de 0,53 Kg/m² equivalente al 37,79% de pérdida en relación con los demás procesos erosivos para el mismo suelo. Esto indica, que para proteger dicho suelo contra la erosión, además del establecimiento de una cobertura vegetal densa, es necesaria la realización de otras practicas preventivas complementarias, como son las barreras vivas de limoncillo (*Cymbopogon citratus*), a través de la pendiente del terreno, para contrarrestar la energía de las aguas por efecto de la escorrentía ladera abajo.

Los resultados de pérdidas de suelos por dispersión de agregados reportados anteriormente, contrastan con los valores promedio encontrados en la Unidad Guamal, *Typic eutropepts* 1,65 Kg/m² equivalente al 23,33% de pérdida en relación con los demás procesos erosivos para el mismo suelo (**Tabla 4**), por tratarse de un suelo con menor estabilidad estructural y propiedades físicas desfavorables en relación con los demás, discutidos anteriormente.

- Pérdidas de suelo depositado en el canal de escorrentía

Esta es la cantidad de suelo que se deposita en el canal de escorrentía y que las aguas de escorrentía, no son capaces de arrastrar durante los 60 minutos de duración del aguacero. Este es el segundo proceso de pérdidas de suelo por erosión en importancia, después de las pérdidas de suelos por dispersión de agregados. Este proceso de erosión, está presente principalmente en los suelos con tamaño de agregados < 0,5 mm (**Tabla 4**).

Los valores más altos de pérdidas de suelo, depositado en el canal de escorrentía, están presentes, en el suelo Unidad Guamal, *Typic eutropepts* (**Tabla 4, Figura 1**), con pérdidas de suelo de 0,87 Kg/m² promedio, equivalente al 12,29% promedio dentro de todos los procesos del mismo suelo, seguido por la Unidad Parnaso, *Typic eutropepts*, con pérdidas promedio de suelo de 0,65 Kg/m², que representa el 46,57% para el mismo suelo.

Como se puede observar entre los diferentes procesos descritos anteriormente, el que más favorece la erosión, es la dispersión de agregados por efecto del impacto de la lluvia en el suelo totalmente desnudo, especialmente en los suelos derivados de cenizas volcánicas, *Melanudands*. Este proceso es favorecido en el campo, por la intensidad alta de las lluvias de la Zona Cafetera Colombiana (intensidades máximas en 30 minutos, entre 66 a 86 mm/h) (Rivera, 1990), pendientes escarpadas (mayores del 75%) y de longitudes muy largas (500 a 800 m) (Federacafé, 1982b).

Después de un aguacero, las pérdidas por dispersión de agregados son altas y estas se acumulan en el canal de escorrentía en su parte baja y en las paredes de la lámina metálica que sirve de obstáculo al suelo que se pierde por dispersión. No obstante estas pérdidas, el suelo distribuido sobre la bandeja, no da signos de erosión. Esta misma situación, se observa en condiciones de campo, lo cual, confunde al agricultor y a los Técnicos que los asesoran, en la creencia, que no se presenta erosión después de un aguacero en estos suelos de cenizas volcánicas y, por tanto, se les continúe manejando en forma irracional, mediante el uso generalizado y reiterado del azadón y los herbicidas, dejándolos totalmente desnudos y expuestos al impacto directo de lluvias. Cenicafé, ha realizado investigaciones en parcelas de escorrentía, dejando el terreno totalmente desprovisto de coberturas vegetales durante los aguaceros, con el uso del azadón, encontrando pérdidas de suelo hasta de 430 t/ha.año promedio (Suárez de Castro y Rodríguez, 1962; Federacafé, 1982a). Lo observado en los suelos derivados de cenizas volcánicas, contrasta con lo mostrado por la Unidad Guamal, *Typic Eutropepts*, donde por efecto de la escorrentía, predomina la erosión en surcos.

- PÉRDIDAS TOTALES PROMEDIO DE SUELO POR EROSIÓN DE CINCO SUELOS DE LADERA DELA ZONA CAFETERA COLOMBIANA.

En la **Tabla 4 y Figura 1**, se presenta las pérdidas totales promedio de suelo por erosión. Se observa, como la Unidad Guamal, muestra la susceptibilidad a la erosión más alta, con pérdidas de suelos de 7,07 kg/m² promedio, seguida por las Unidades Montenegro, *Melanudands* (2,56 kg/m²) y Chinchiná, *Melanudands* (1,78 kg/m²) promedio.

La Unidad de suelo más resistente a la erosión es la Fresno, *Melanudands* ($1,19 \text{ kg/m}^2$), seguido por la Unidad Parnaso, *Typic eutropepts* ($1,39 \text{ kg/m}^2$) (**Tabla 4**). La susceptibilidad alta a la erosión encontrada en la Unidad Guamal ($7,07 \text{ kg/m}^2$ promedio), se debe a su material de origen (areniscas olivínicas), desarrollo bajo del perfil, presencia alta de grava en el perfil, contenido bajo de materia orgánica (3,9%) (**Tabla 3**), contenido alto de arcilla (42%) (**Tabla 3**), permeabilidad y estabilidad de agregados baja (Federacafé, 1982a,1982b; Rivera y Gómez, 1991a). Suelos como la Unidad Guamal sujetos al sellamiento superficial, pueden reducir la infiltración e incrementar la escorrentía y con ello, el transporte de sedimentos (Bajracharya *et al*, 1992). De acuerdo con la escala de calificación de pérdidas de suelo por erosión generada por Federacafé 1992a, los suelos estudiados presentan susceptibilidad a la erosión de muy alta a muy severa. Por tanto el uso, manejo y conservación de estos suelos debe ser muy racional.

- **Análisis Estadísticos de las pérdidas de suelo por flujo de agua por Escorrentía.**

En un análisis de regresión para las pérdidas de suelo por flujo de agua por escorrentía, se observó, que los Coeficientes de Variación (CV), son de altos a bajos para las cinco Unidades de suelo, cuando el tamaño de agregados es de 1-2 mm, con valores que oscilan desde 115,95 a 22,77, para las Unidades de suelo Chinchiná y Montenegro respectivamente. Entre menor el tamaño de los agregados de suelo, así mismo hay la tendencia a disminuir el coeficiente de variación.

En las correlaciones lineales simples entre las pérdidas de suelo por flujo de agua por escorrentía en relación con el tiempo de aplicación del aguacero con intervalos de cinco minutos, se observó como a medida que se reduce el tamaño de las agregados de suelo, así mismo, se mejoran las correlaciones, con excepción de la Unidad Guamal. La correlación mejor se presentó para la Unidad Parnaso, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,98$, seguido por la Unidad Fresno, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,94$ para los tamaños de agregados $< 0,5 \text{ mm}$ de diámetro. Se observó como en la Unidad Guamal, las pérdidas de suelo por flujo de agua por escorrentía, es muy alto a través del tiempo comparado con las demás Unidades de suelos, con coeficientes de determinación $R^2 = 0,70, 0,92$ y $0,22$, para los tamaños de agregados 1-2, 0,5-1 y $< 0,5 \text{ mm}$ de diámetro respectivamente. A medida que disminuye el diámetro de las agregados de suelo, de igual forma se incrementa el flujo por escorrentía, especialmente en las Unidades de suelo Guamal, y Montenegro.

- **Análisis Estadísticos de las pérdidas de suelo por flujo de agua por Percolacion.**

En un análisis de regresión para las pérdidas de suelo por flujo de agua por Percolacion, se observó, que los Coeficientes de Variación (CV), son de bajos a altos para las cinco Unidades de suelo, al igual que para los diferentes tamaños de agregados, con valores que oscilan desde 125,8 (para la Unidad Parnaso con tamaño de agregados $< 0,5 \text{ mm}$) a 15,82 (en la Unidad Chinchiná con tamaño de agregados de 1-2 mm). Entre más pequeño el tamaño de los agregados de suelo, hay la tendencia a un incremento en el coeficiente de variación.

La correlación simple mejor entre las pérdidas de suelo por flujo de agua por Percolacion en relación con el tiempo de aplicación del aguacero con intervalos de cinco minutos, se presentó en la Unidad Montenegro, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,64$, seguido por la Unidad Parnaso, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,62$ para el tamaño de agregados 1-2 mm de diámetro. Se observa la tendencia que entre más pequeño el tamaño de los agregados de suelo, las correlaciones son menores. Para todos los suelos estudiados, se observó, la tendencia a disminuir la pérdida de suelo por percolacion a medida que transcurre el tiempo del aguacero, siendo más marcado el proceso en la Unidad Guamal, con un coeficientes de determinación $R^2 = 0,23$, seguido por la Unidad Montenegro, con un coeficientes de determinación $R^2 = 0,64$ para el tamaño de agregados de 1-2 mm en ambos casos. Hay la tendencia a incrementarse las pérdidas de suelo por flujo de percolación en las Unidades de suelo Parnaso y Montenegro, con coeficientes de determinación muy bajos, $R^2 = 0,06$ y $R^2 = 0,24$ respectivamente

Factor erodabilidad del suelo, K_i del WEPP.

En la **Tabla 5**, se presenta los factores de erodabilidad K_i y K de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana.

Tabla 5, Factores de erodabilidad K_i (kg.s.m^{-4}), K (t.ha.h./Mj.mm.ha) de tres tamaños de agregados (mm) de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana

UNIDAD DE SUELO	MATERIA ORGÁNICA (%)			$K_i \times 10^6$ (kg.s.m^{-4})			K (t.ha.h./Mj.mm.ha)		
	Tamaño de agregados (mm)								
	2-1	1-0,5	< 0,5	2-1	1-0,5	< 0,5	2-1	1-0,5	< 0,5
CHINCHINA (<i>Melanudands</i>)	15,9	13,7	12,5	1,91	5,53	13,25	0,002	0,005	0,01
MONTENEGRO (<i>Melanudands</i>)	14	12,9	9,8	1,39	3	25,39	0,001	0,003	0,02
FRESNO (<i>Melanudands</i>)	20,6	15,5	17,2	1,98	3,11	8,75	0,002	0,003	0,008
GUAMAL (<i>Typic eutropepts</i>)	3,8	4,8	3,1	13,76	14,39	53,94	0,01	0,01	0,05
PARNASO (<i>Typic eutropepts</i>)	8,4	7,8	6,6	2,05	3,86	11,5	0,002	0,002	0,004

La erodabilidad, K_i , más alta, se encuentra en la Unidad Guamal, *Typic eutropepts*, con valores de 13,76; 14,39 y 53,94 kg s/m^4 , para cada uno de los tamaños de agregados, 1-2; 0,5-1 y < 0,5 mm de diámetro respectivamente, seguido por la Unidad Montenegro, *Melanudands*, con valores de 1,39; 3,0 y 25,39 kg s/m^4 , para los mismos tamaños de agregados mencionados. Esto indica, que entre los cinco suelos estudiados, estos dos son los más susceptibles a la erosión, cuya susceptibilidad se incrementa a medida que el tamaño de los agregados de suelo se hacen menores. Esta condición, permite orientar al técnico y al agricultor, en el sentido, que estos suelos no deben ser laborados con maquinaria agrícola que conlleve a la remoción, destrucción y transformación de los agregados naturales del suelo a tamaños menores, que son fácilmente dispersados por las gotas de lluvia y arrastrados por las aguas de escorrentía, estos sedimentos, obran, además, como sellantes de poros, destruyendo la continuidad de estos y limitando el flujo de agua en el perfil del suelo.

Los factores de erodabilidad más bajos, están en la Unidad de suelo Fresno, *Melanudands*, con valores de 1,98, 3,11 y 8,75 kg.s/m^4 , para los diferentes tamaños de agregados, 1-2; 0,5-1 y < 0,5 mm respectivamente, seguido por la Unidad Parnaso, *Typic eutropepts*, con valores de 2,05, 3,86 y 11,5 kg s/m^4 , para los mismos tamaños de agregados descritos anteriormente en forma respectiva (**Tabla 5**).

Los valores bajos de erodabilidad, encontrados en la Unidad Fresno, *Melanudands*, se debe, a su contenido alto de materia orgánica (18%) (**Tabla 5**), a la permeabilidad moderada, densidad aparente baja y presencia de alófana y caolinita en el perfil del suelo (Federacafé, 1982a,b).

No obstante, las propiedades físicas buenas de este suelo y su erodabilidad baja en relación con las otras Unidades de suelos, no implica que necesariamente sea resistente a la erosión, ya que su susceptibilidad continúa siendo alta y, por tanto, no se le puede dar un uso y manejo intensivo con azadón o maquinaria agrícola que conlleve a la remoción del suelo y destrucción de sus agregados naturales, sino que por el contrario, se le debe dar un Uso y Manejo racional, con practicas preventivas de conservación de suelos en forma intensiva, como son, la selección de las coberturas nobles (Manejo Integrado de Arvenses) (Rivera, 1994, 1997a, 1997b, 1999b) en el caso del cultivo del café; pastos con rotación de potreros evitando el sobrepastoreo que conduzca a la compactación y formación de terracetos, surcos y cárcavas profundas, que conlleven a su degradación y a las pérdidas de agua por escorrentía excesiva.

- Factor erodabilidad del suelo K de la USLE.

En la Tabla 5, al igual que para el factor K_i del WEPP, se presenta los factores de erodabilidad K de la USLE, de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana.

Los factores de erodabilidad, K , más altos, se encontraron en la Unidad de suelo Guamal, *Typic eutropepts*, con valores de 0,01, 0,01 y 0,05 t.ha.h./Mj.mm.ha, para los diferentes tamaños de agregados, 1-2; 0,5-1 y < 0,5 mm respectivamente, seguido por la Unidad Montenegro, *Melanudands*, con valores de 0,001; 0,003 y 0,02 t.ha.h./Mj.mm.ha, para los mismos tamaños de agregados ya descritos, respectivamente.

Los factores de erodabilidad, K , más bajos, se presentan en la Unidad Fresno, *Melanudands*, con valores de 0,002, 0,003 y 0,008 t.ha.h./Mj.mm.ha, para los diferentes tamaños de agregados, 1-2, 0,5-1 y < 0,5 mm respectivamente, seguido por la Unidad Parnaso, *Typic eutropepts*, con valores de 0,002, 0,002 y 0,004 t.ha.h./Mj.mm.ha, para los mismos tamaños de agregados ya descritos, respectivamente (**Tabla 5**).

Como se puede observar, los valores de K , presentan un comportamiento similar a los de K_i , en relación con el tamaño de agregados del suelo, en el sentido que entre menor es el diámetro de estos, así mismo se incrementan los valores de la erodabilidad de los suelos y su susceptibilidad a la erosión.

La erodabilidad del suelo es una función de su arranque y transporte por efecto de las lluvias. Ambos dependen de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. El arranque del suelo es una propiedad dinámica y cambia con el tiempo, aún durante el evento del aguacero (Poesen, 1981, citado por Vaneland et al., 1987).

La susceptibilidad del suelo a la erosión es compleja y esta influida por muchas propiedades que interactúan con el clima y los sistemas de manejo. Los procesos que gobiernan la erodabilidad de los suelos, no son bien entendidos, por lo cual, se requiere mayor investigación que permita comprender los principios que la influyen (Lal, 1990).

Se determinó la relación entre la materia orgánica en porcentaje y los factores de erodabilidad K_i (Kg s/m^4) y K (t.ha.h./Mj.mm.ha) (**Figura 2**). Esta relación, mostró la tendencia de estos factores a incrementarse, a medida que disminuye el contenido de materia orgánica. En esta relación, se observó también, que ambas curvas de erodabilidad (K_i y K) tienen un desplazamiento similar, y al crear un segundo eje para las unidades del factor K_i , las dos líneas se superponen, indicando que la única diferencia entre ellas, son sus unidades. Esta relación, es comprobada a través de una regresión lineal simple, con un coeficiente de determinación $R^2 = 1,00$ (**Figura 3**), lo cual orienta en la posibilidad de utilizar los valores de K de la USLE, haciendo una conversión simple de unidades y la validación respectiva de campo. No obstante es necesario para el caso del K hacer el ajuste respectivo con la parcela estándar de 22 m de largo por 1,8 m de ancho y pendiente uniforme del 9% (Wischmeier y Smith, 1965). En las regresiones lineales simples entre contenido de materia orgánica en porcentaje y los factores de erodabilidad K_i (kg s/m^4) y K (t.ha.h./Mj.mm.ha), se observó en ambos casos, que cuando se incrementa el contenido de materia orgánica, los factores de erodabilidad decrecen, con coeficientes de determinación $R^2 = 0,34$ y $R^2 = 0,33$ respectivamente (**Figuras 4 y 5**), coeficientes muy bajos comparados con los encontrados por Rivera, 1990; Rivera y Gómez, 1991a, con $R^2 = 0,86$, para los mismos suelos, utilizando la ecuación del nomograma de Wischmeier y Smith, 1978. Cuando fue usado el contenido de materia orgánica promedio de los diferentes tamaños de agregados de cada suelo, los coeficientes de determinación fueron más altos, $R^2 = 0,58$ y $0,60$, para K_i (kg s/m^4) y K (t.ha.h./Mj.mm.ha) respectivamente. No obstante, estos valores continúan siendo bajos, por lo que se procedió a dar un mejor ajuste, mediante una regresión exponencial, con la cual, se tuvieron coeficientes de determinación $R^2 = 0,91$ y $0,87$, para K_i (kg.s/m^4) y K (t.ha.h./Mj.mm.ha) respectivamente (Rivera 1999). Esto indica, que la mayor o menor susceptibilidad de los suelos de la Zona Cafetera Colombiana a la erosión, depende fuertemente de su contenido de materia orgánica, siendo más resistentes a medida que esta se incrementa y viceversa. Por tanto, para tener una agricultura sostenible en estos suelos de ladera, sin deterioro de los recursos suelo y agua, es necesario, proteger la materia orgánica del suelo, mediante un buen manejo de la misma, de tal forma, que no quede expuesta a los efectos directos de la radiación solar, que acelere los procesos de mineralización, ni al impacto directo de las gotas de lluvia que dispersen, laven y arrastren las agregados de suelo. Esto se logra, mediante una buena selección de las coberturas vegetales que acompañan los cultivos, especialmente las coberturas nobles, que no compiten con ellos (arvenses nobles), de las cuales la Federación Nacional de Cafeteros tiene identificadas 27 especies aproximadamente (Rivera, 1994; Gómez y Rivera, 1995). Además, se debe aprovechar al máximo los residuos vegetales provenientes de las cosechas y de la renovación de los cafetales por zoqueo, para cubrir el suelo totalmente con la ramilla y hojarasca, mientras se descompone y se establecen las arvenses nobles. De esta manera, se pueden alimentar los micro y macroorganismos del suelo

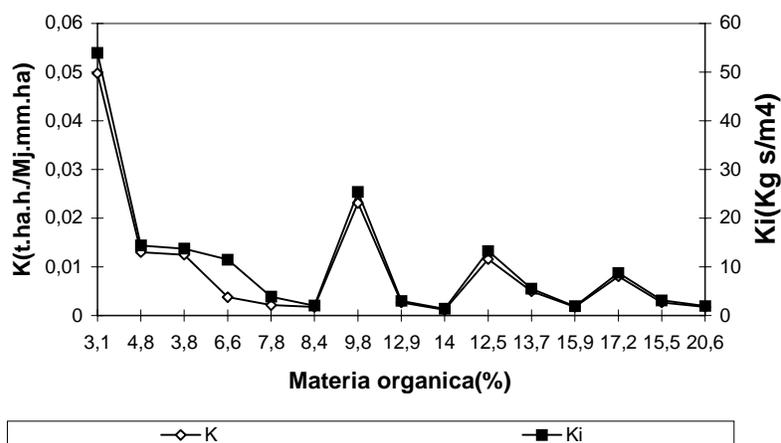


Figura 2 Relación entre materia orgánica (%) y factores erodabilidad K (t.ha.h./Mj.mm.ha) y Ki (kg s/m4) de cinco suelos de zona cafetera colombiana

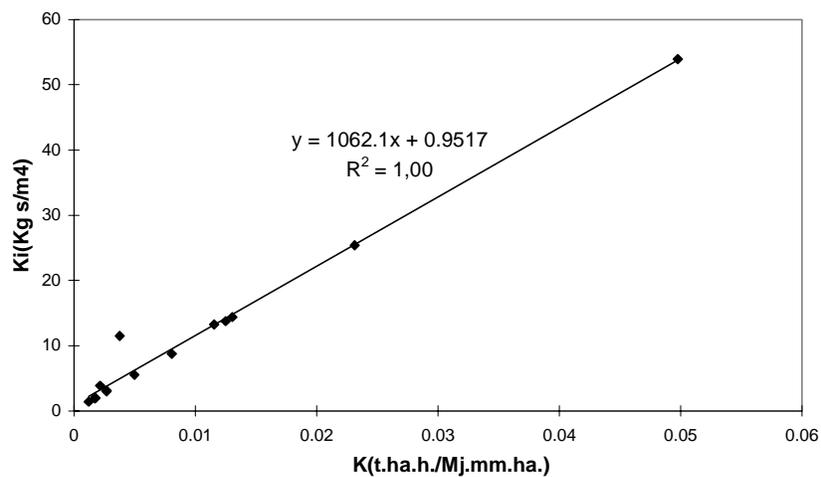


Figura 3. Regresión lineal simple entre factores erodabilidad Ki(kg s/m4) y K(t.ha.h/Mj.mm.ha) de cinco suelos de zona cafetera colombiana.

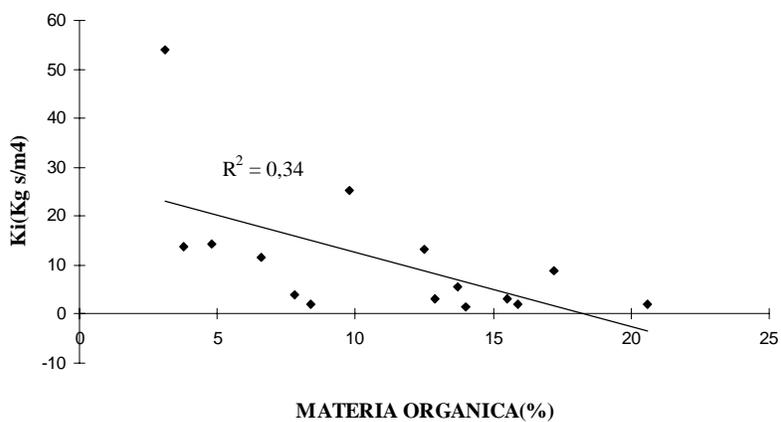


Figura 4. Regresión lineal entre Materia Orgánica (%) y factor erodabilidad promedio Ki(kg.s.m⁻⁴)

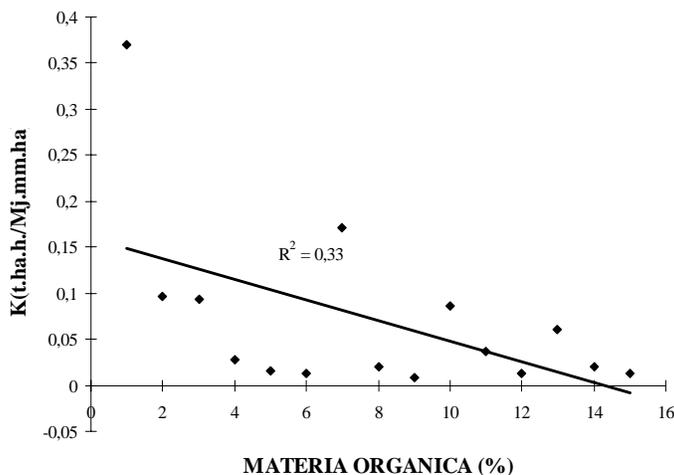


Figura 5. Regresión lineal entre Materia Orgánica (%) y factor erodabilidad promedio K(t.ha.h/Mj.mm.h)

como la lombriz de tierra, los cuales representan un papel importante en el mantenimiento y mejoramiento de la estructura del suelo, contribuyendo a la formación de agregados y macroporos del suelo (Edwards y Bater, 1992, citado por Lal, 1994a; Primavesi, 1984).

- **Relación entre tamaño de agregados del suelo en mm y el contenido de materia orgánica en porcentaje.**

Mediante correlaciones lineales simples, se observó como a medida que decrece el tamaño de agregados del suelo, así mismo, disminuye el contenido de materia orgánica (%) (**Figura 6**). La regresión más ajustada, la presenta la Unidad de suelo Chinchiná, *Melanudands*, con un coeficiente de determinación $R^2 = 1,00$, seguido por la Unidad Parnaso, *Typic eutropepts*, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,86$.

La correlación más baja, la presentó la Unidad Guamal, *Typic eutropepts*, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,05$. Esto se debe posiblemente al material de origen de estos suelos, altamente susceptibles a la erosión.

- **Correlación lineal simple entre el tamaño de agregados (mm) y factores de erodabilidad K_i (kg.s/m⁴) y K (t.ha.h./Mj.mm.ha).**

Para ambos Factores de erodabilidad K_i y K, las regresiones más altas están presentes en la Unidad de suelo Chinchiná, *Melanudands*, con coeficientes de determinación $R^2 = 0,85$ y $R^2 = 0,84$ respectivamente, seguido por la Unidad de suelo Fresno, *Melanudands* con coeficientes de determinación $R^2 = 0,72$ y $R^2 = 0,70$ para K_i y K respectivamente (**Figuras 7 y 8**). Estos valores indican, que cuando el tamaño de agregados decrece, los factores de erodabilidad K_i y K se incrementan y así mismo la susceptibilidad de los suelos a la erosión. Situación que se debe a los cambios ocasionados en el grado de agregación y estabilidad de agregados, al disturbar los agregados mayores, lo cual conlleva a la destrucción de raicillas de las plantas y del mucilago exudado por ellas, que ejercen una influencia fuerte en la agregación natural de las partículas de los suelos (Primavesi, 1984; Young et al, 1985). Por tanto, no es conveniente el uso del azadón, maquinaria agrícola ni instrumentos que conduzcan a la destrucción de los agregados naturales mediante pulverización de estos suelos

La correlación más baja, se presentó en la Unidad de suelo Guamal, *Typic eutropepts*, con coeficientes de determinación $R^2 = 0,59$ y $R^2 = 0,58$ para K_i y K respectivamente. La erodabilidad en este suelo es alta para todos los tamaños de agregados y ligeramente más alta cuando los agregados de suelo es < 0,5 mm.

- **Relación entre capacidad de intercambio cationico (CIC) en cmol(+)/kg de suelo y factores de erodabilidad K_i (kg.s/m⁴) y K (t.ha.h./Mj.mm.ha).**

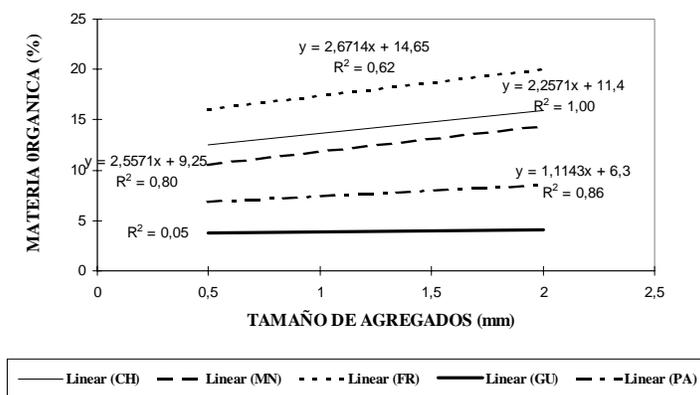


Figura 6. Regresión lineal entre tamaño de agregados del suelo (mm) y Materia Orgánica (%) de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana. ((CH) Unidad Chinchiná, (MN) Unidad Montenegro, (FR) Unidad Fresno, (GU) Unidad Guamal, (PA) Unidad Parnaso).

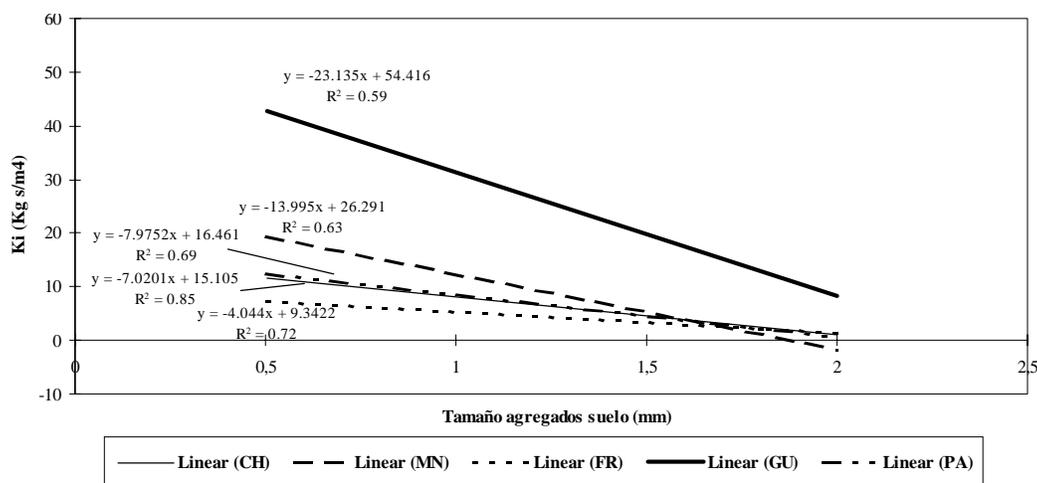


Figura 7. Regresión lineal entre Tamaño de agregados del suelo (mm) y el Factor de Erodabilidad Ki (kg s/m⁴) de cinco suelos de la zona cafetera colombiana.

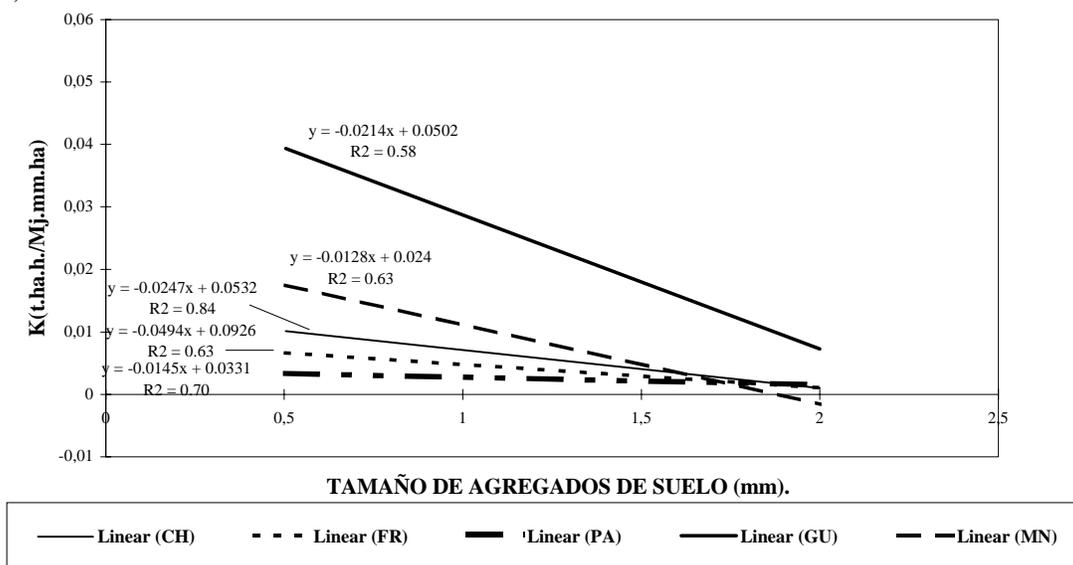


Figura 8. Regresión lineal entre Tamaño de agregados del suelo (mm) y el Factor de Erodabilidad K (t.ha.h./MJ.mm.ha) de cinco suelos de la zona cafetera colombiana

Se encontró una regresión lineal simple entre la capacidad de intercambio cationico (CIC) en $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ de suelo y los factores de erodabilidad K_i ($\text{Kg.s}/\text{m}^4$) y K ($\text{t.ha.h.}/\text{Mj.mm.ha}$), con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,76$ y $R^2 = 0,81$, para K_i y K respectivamente. Por tanto, cuando se incrementa la CIC, ambos factores de erodabilidad decrecen y viceversa, lo cual esta muy relacionado con el contenido de materia orgánica del suelo.

Propiedades físicas a través del perfil del suelo y su relación con el Uso, Manejo y Conservación.

En la **Tabla 6**, se presentan algunas propiedades físicas de los suelos estudiados, con mayor relación en cuanto al uso, manejo y conservación de los mismos. Estas propiedades fueron determinadas durante la segunda fase del trabajo, a profundidades de 0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm dentro del perfil del suelo.

Arenas, limos y arcillas: En la Tabla 6 se observa un predominio promedio de arenas para las unidades Chinchiná (60,91 %), Montenegro (61,97 %) y Fresno (62,96 %). Estos valores no presentan diferencias significativas entre sí. Por tanto arar y rastrillar estos suelos, conduce a la destrucción rápida de su estructura natural y de muchas propiedades físicas que serán descritas adelante. En contraste, las unidades Guamal y Parnaso, muestran predominio promedio de arcillas 41,00 y 42,58 % respectivamente, con diferencias no significativas. Esto no significa que puedan ser labrados con maquinaria agrícola, ya que existen otros factores como las lluvias intensas, pendientes fuertes y otros parámetros físicos y químicos que los hacen altamente susceptibles a la erosión y a los movimientos masales, que se estudiarán más adelante.

El porcentaje alto de arenas en las unidades de suelos estudiadas, no indica la mayor o menor susceptibilidad a la erosión de estos suelos, sino que esta dado por el tamaño de las mismas. En la profundidad de 0-10 cm dentro del perfil del suelo, las arenas mayores de 1 mm de diámetro promedio ($A > 1$) y las menores de 0,05 mm ($A < 0,05$), tienen una correlación lineal positiva con la susceptibilidad de los suelos a la erosión y un coeficiente de determinación alto ($R^{2**} = 0,95$) en ambos casos. Lo que indica que porcentajes altos de arenas mayores de 1 mm de diámetro promedio y menores de 0,05 mm, influyen en una erosión mayor de los suelos. Así mismo, las arenas entre 0,25 a 0,1 mm de diámetro promedio, presentan una correlación lineal negativa con la susceptibilidad de los suelos a la erosión K_i y un coeficiente de determinación alto ($R^{2**} = 0,96$), o sea que a mayor porcentaje de estas arenas, más resistentes serán los suelos a la erosión y viceversa (**Tabla 7**). Esta situación, no se presenta para la profundidad promedio de 0-60 cm dentro del perfil del suelo (**Tabla 8**).

Densidad aparente: Dentro de las diferentes unidades de suelos, las derivadas de cenizas volcánica (Chinchiná Montenegro y Fresno), presentan los valores promedio a través del perfil del suelo, más bajos (0,82; 0,75 y 0,57 g cm^{-3} respectivamente). Entre las unidades Chinchiná y Montenegro no hay diferencias altamente significativas. Los valores más bajos de densidad aparente entre todos los suelos se presenta en la unidad Fresno, con diferencia altamente significativa en relación con las otras dos unidades. La densidad aparente de estos suelos a través de la profundidad, muestra su uniformidad en el perfil, lo que permite un paso continuo del agua y con ello mayor estabilidad a problemas de remociones en masa. La densidad aparente baja de estos suelos, indica, que no es necesario usar maquinaria agrícola que conduzca a la pulverización y remoción del suelo, para el establecimiento de cualquier tipo de cultivo.

Las unidades Guamal y Parnaso, muestran los valores promedio mas altos de densidad aparente a través del perfil del suelo (1,55 y 1,11 g cm^{-3} , respectivamente) Estas dos unidades, tienen diferencias altamente significativas entre sí y con todos los otros suelos estudiados. Estos valores altos de densidad aparente, indican la necesidad de hacer hoyos más grandes para la siembra de cultivos perennes, tales como forestales, cítricos y café entre otros. A pesar de la densidad aparente alta de estos suelos, no es conveniente el uso de la maquinaria agrícola que conduzca a la pulverización y remoción del suelo, ya que por las lluvias intensas de la zona y, pendientes fuertes (mayores del 70%) son altamente susceptibles a la erosión y a los movimientos masales.

A través del perfil del suelo, las unidades Chinchiná, Montenegro, Fresno y Parnaso, no presentaron diferencias significativas en densidad aparente. La unidad Guamal, a la profundidad de 20 a 40 cm, tiene densidad aparente más baja (1,43 g cm^{-3}) con diferencia significativa en comparación con la profundidad de 0 a 10 y 40 a 60 cm. Esto se debe a la presencia de un horizonte orgánico enterrado a dicha profundidad en el sitio de muestreo.

Tabla 6. Propiedades físicas promedio de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana en diferentes profundidades de suelo

UNIDAD SUELO	Profundidad (cm)	PROPIEDADES FÍSICAS												
		Ar (%)	L (%)	A (%)	Da (g/cm ³)	Dr (g/cm ³)	Pt (%)	Ea (%)	PERM cm/h	RTC kPa	RESPEN kPa	IE (%)	SPDP (%)	ADISP (%)
CHINCHINA <i>Melanudands</i>	0-10	9,55a*	29,70a*	60,74a*	0,82a*	2,36a*	65,40ab*	54,48a*	4,34a*	100,7a*	4,80a*	3,55a*	5,40*	20,97a*
	10-20	6,09b*	33,49a*	60,42a*	0,86a*	2,38a*	63,62a*	47,01a*	3,99ab*	124,0b*	8,02b*	4,64a*	5,38*	27,38a*
	20-40	5,30b*	34,14a*	60,56a*	0,80a*	2,4a*	66,63b*	47,54a*	3,70ab*	-	12,43c*	-	-	22,05a*
	40-60	4,68b*	33,40a*	61,93a*	0,80a*	2,4a*	65,98ab*	47,12a*	3,11b*	-	15,48d*	-	-	22,84a*
	\bar{X}	6,4a**	32,69a**	60,91a**	0,82a**	2,39a**	65,41a**	49,0a**	3,79a**	112,37a**	10,18a**	4,1a*	5,39a*	23,30ab**
MONTENEGRO <i>Melanudands</i>	0-10	11,00a	30,47a*	58,52a*	0,73a*	2,41a*	69,54ab*	48,07a*	6,49a*	99,3a*	4,78a*	2,72a*	5,18a	25,38a*
	10-20	7,11b*	31,34a*	61,55ab*	0,78a*	2,40a*	67,32a*	47,84a*	7,26a*	114,6b*	8,17b*	5,66b*	5,21a	20,42a*
	20-40	7,21b*	29,44a*	63,32b*	0,78a*	2,43a*	67,75a*	47,54*	9,50b*	-	12,00c*	-	-	19,58a*
	40-60	5,69b*	29,83a*	64,47b*	0,71a*	2,46a*	71,12b*	49,70a*	7,81ab*	-	14,02c*	-	-	20,21a*
	\bar{X}	7,75a**	30,27a**	61,97a**	0,75a**	2,42a**	68,87ab**	48,3a**	7,78b**	106,94a**	9,74a**	4,18a*	5,19d*	21,40b**
FRESNO <i>Melanudands</i>	0-10	8,55a*	29,03a*	62,41a*	0,56a*	2,18a*	73,97a*	51,39a*	7,86a*	85,47a*	3,81a*	5,28a*	5,07a	21,53a*
	10-20	7,61a*	32,64a*	59,74a*	0,56a*	2,16a*	73,73a*	48,09a*	6,26ab*	84,47a*	5,28ab*	8,22b*	4,96b	33,70b*
	20-40	7,06a*	29,87a*	63,06a*	0,58a*	2,21a*	73,52a*	45,06a*	3,79b*	-	6,76b*	-	-	30,75b*
	40-60	6,51a*	26,85a*	66,63a*	0,56a*	2,12a*	69,76a*	46,10a*	5,14ab*	-	9,03c*	-	-	29,40b*
	\bar{X}	7,44a**	29,59a**	62,96a**	0,57b**	2,17b**	72,75b**	47,7a**	5,73c**	84,97b**	6,22a	6,84a*	5,01b*	28,84a**
GUAMAL <i>Typic eutropepts</i>	0-10	41,42a*	22,73a*	35,85a*	1,62a*	2,50a*	34,85ab*	34,29a*	0,59a*	61,08a*	13,88a*	29,53a*	4,64a	8,19a*
	10-20	41,88a*	25,28a*	32,82a*	1,49ab*	2,44a*	38,81ab*	33,85a*	0,41a*	78,23b*	21,31b*	82,28b*	3,23b	8,43a*
	20-40	37,25a*	22,68a*	40,05a*	1,43b*	2,49a*	42,34a*	30,73a*	0,46a*	-	22,83b*	-	-	8,38a*
	40-60	43,47a*	25,78a*	30,72a*	1,64a*	2,44a*	32,57b*	29,92a*	0,53a*	-	23,12b*	-	-	10,11a*
	\bar{X}	41,00b**	24,12b**	34,86b**	1,55c**	2,47a**	37,29c**	32,3b**	0,53d**	69,65c**	20,28b**	55,5b*	3,93c*	8,78c**
PARNASO <i>Typic Eutropepts</i>	0-10	42,09a*	18,29a*	39,60a*	1,09a*	2,45a*	55,38a*	39,79a*	2,28a*	43,16a*	9,88a*	3,59a*	5,42a	9,73a*
	10-20	42,73a*	20,64ab*	36,62a*	1,10a*	2,42a*	54,38a*	40,36a*	0,62b*	44,49a*	12,54b*	31,22b*	4,56b	8,63a*
	20-40	46,31a*	24,85bc*	28,85a*	1,10a*	2,48a*	55,14a*	41,89a*	0,45b*	-	15,15c*	-	-	11,73ab*
	40-60	39,23a*	26,53c*	34,25a*	1,13a*	2,44a*	53,41a*	43,57a*	0,48b*	-	19,96d*	-	-	12,17ab*
	\bar{X}	42,58b**	22,58b**	34,84b**	1,11d**	2,45a**	54,59d**	41,3c**	0,95d**	43,83d**	14,38c**	17,06c*	5,00b*	10,57c**
PROMEDIO DE SUELO PROFUNDIDAD	0-10	22,52a**	26,05a**	51,42a**	0,96a**	2,38a**	59,83a**	45,60a**	4,27a**	77,94a**	7,43a*	8,85a*	5,14a*	17,16a*
	10-20	21,08a**	28,68a**	50,23a**	0,96a**	2,36a**	59,57a**	43,43a**	3,71ab**	89,16b**	11,06b*	26,22b*	4,67b*	19,71a*
	20-40	20,63a**	28,19a**	51,17a**	0,94a**	2,40a**	61,08a**	42,49a**	3,61ab**	-	13,83bc*	-	-	18,50a*
	40-60	19,91a**	28,48a**	51,60a**	0,97a**	2,37a**	58,57a**	43,28a**	3,42a**	-	16,32c*	-	-	18,95a*

Valores identificados con letras distintas presentan diferencia estadística significativa comparados mediante la prueba de Tukey al 5 % (*) o altamente significativa Tukey al 1% (**). A: Arena, L: Limo, Ar: Arcilla Da: Densidad aparente, Dr: Densidad Real, Pt: Porosidad Total, Ea: Espacio Aereo, PERM: onductividad Hidráulica, RTC: Resistencia Tangencial al Corte, RESPEN: Resistencia a la penetración, IE: Índice de Estabilidad de la Agregación, SPDP: Sumatoria Peso Diámetro Promedio de Agregados, ADISP: Agua Disponible.

Tabla 7. Coeficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación R² entre los índices de erodabilidad Ki y K y propiedades físicoquímicas de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana promedio de tres usos en los primeros 0 a 10 cm de profundidad (Rivera, 1999a).

FACTORES *VARIABLES	Ki (WEPP)			K (USLE)		
	(r)	R ²	Significancia	(r)	R ²	Significancia
Ki (WEPP)	1,00	1,00	0,0001**	1,00	1,00	0,0001**
K (USLE)	1,00	1,00	0,0001**	1,00	1,00	0,0001**
Da	0,87	0,75	0,06**	0,87	0,76	0,05*
Pt	-0,87	0,76	0,05*	-0,87	0,76	0,05*
DSAG 2 - 1	-0,93	0,87	0,02*	-0,93	0,87	0,02*
RFP	0,90	0,81	0,04*	0,90	0,81	0,04*
AG > 2 CA	-0,88	0,78	0,05*	-0,88	0,78	0,05*
AG 2- 1 CA	0,95	0,90	0,01*	0,95	0,90	0,01*
AG 1- 0,5 CA	0,94	0,88	0,02*	0,94	0,88	0,02*
AG 0,5-0,25 CA	0,96	0,91	0,01**	0,96	0,92	0,01**
AG < 0,25 CA	0,96	0,92	0,01**	0,96	0,92	0,01**
AAG 2 - 1	0,94	0,89	0,02*	0,94	0,88	0,02*
AAG 1- 0,5	0,96	0,91	0,01*	0,96	0,91	0,01*
AAG 0,5 - 0,25	0,96	0,93	0,01**	0,96	0,93	0,009**
AAG < 0,25	0,99	0,98	0,002**	0,99	0,98	0,001**
AG 2 - 1 SA	0,94	0,89	0,02*	0,94	0,89	0,02*
AG 1 - 0,5 SA	0,93	0,87	0,02*	0,93	0,87	0,02*
AG 0,5 - 0,25 SA	0,95	0,90	0,01*	0,95	0,90	0,01*
AG < 0,25 SA	0,91	0,84	0,03*	0,92	0,84	0,03*
IE	0,96	0,92	0,01**	0,96	0,92	0,01**
PDPAG > 2	-0,88	0,78	0,05*	-0,88	0,78	0,05*
PDPAG 2 - 1	0,95	0,90	0,01*	0,95	0,90	0,01*
PDPAG 1 - 0,5	0,94	0,88	0,02*	0,94	0,88	0,02*
PDPAG 0,5- 0,25	0,96	0,92	0,01*	0,96	0,92	0,01*
PDPAG < 0,25	0,96	0,93	0,01**	0,96	0,93	0,01**
A > 1	0,97	0,95	0,005**	0,97	0,95	0,005**
A 0,25 - 0,1	-0,98	0,96	0,003**	-0,98	0,96	0,003**
A < 0,05	0,97	0,95	0,005**	0,97	0,95	0,0057**

Tabla 8. Coeficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación R² entre los índices de erodabilidad Ki y K y propiedades físicoquímicas de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana promedio de tres usos en la profundidad promedio de 0 a 60 cm (Rivera, 1999a).

FACTORES *VARIABLES	Ki (WEPP)			K (USLE)		
	(r)	R ²	Significancia	(r)	R ²	Significancia
Ki (WEPP)	1,00	1,00	0,0001**	1,00	1,00	0,0001**
K (USLE)	1,00	1,00	0,0001**	1,00	1,00	0,0001**
DSAG 2 - 1	-0,97	0,93	0,01**	-0,97	0,94	0,0070**
AG > 2 CA	-0,91	0,82	0,03*	-0,91	0,83	0,0321*
AG 2- 1 CA	0,89	0,79	0,04*	0,89	0,80	0,0409*
AG 1- 0,5 CA	0,88	0,77	0,05*	0,88	0,78	0,0473*
AG 0,5-0,25 CA	0,93	0,87	0,02*	0,93	0,87	0,0203*
AG < 0,25 CA	0,95	0,90	0,01*	0,95	0,90	0,0141*
AAG 2 - 1	0,98	0,96	0,003*	0,98	0,96	0,0030**
AAG 1- 0,5	0,97	0,93	0,01*	0,97	0,93	0,0075**
AAG 0,5 - 0,25	0,96	0,93	0,01*	0,97	0,93	0,0076**
AAG < 0,25	0,97	0,94	0,01*	0,97	0,94	0,0061**
SPDP	-0,91	0,82	0,03*			

* P > F < 0,05: Significativo** P > F < 0,01: Altamente significativo

Da : Densidad aparente; Pt : Porosidad total; DSAG 2 - 1 : Distribución en seco de agregados entre 2-1mm de diámetro promedio; RFP : Resistencia final a la penetración; AG > 2 CA: Agregados mayores de 2 mm, con arenas; AG2- 1 CA: Agregados entre 2 a 1 mm, con arenas; AG1- 0,5 CA: Agregados entre 1- 0,5 mm, con arenas; AG 0,5-0,25 CA: Agregados entre 0,5 a 0,25 mm, con arenas; AG < 0,25 CA: Agregados menores de 0,25 mm, con arenas; AAG 2 - 1: Arenas en agregados entre 2-1 mm de diámetro promedio; AAG 1- 0,5: Arenas en agregados entre 1-0,5 mm de diámetro promedio; AAG 0,5 - 0,25: Arenas en agregados entre 0,5-0,25 mm; AAG < 0,25 : Arenas en agregados < 0,25 mm; AG 2 - 1 SA : Agregados entre 2-1 mm de diámetro promedio sin arenas; AG 1 - 0,5 SA: Agregados entre 1-0,5 mm de diámetro promedio sin arenas; AG 0,5 - 0,25 SA: Agregados entre 0,5-0,25 mm de diámetro promedio sin arenas; AG < 0,25 SA : Agregados entre 0,5-0,25 mm de diámetro promedio sin arenas; AG < 0,25 SA: Agregados < 0,25 mm de diámetro promedio sin arenas; IE: Índice de estabilidad de agregados; PDPAG > 2, PDPAG 2-1, PDPAG 1-0,5, PDPAG 0,5-0,25 y PDPAG < 0,25: Peso diámetro promedio de agregados >2, entre 2-1, 1-0,5, 0,5-0,25 y <0,25 mm de diámetro promedio; A > 1:Tamaño de arenas mayores de 1 mm de diámetro promedio; A 0,25 - 0,1: Tamaño de arenas entre 0,25 a 0,1 mm; A < 0,05: Tamaño de arenas menores de 0,05 mm

La densidad aparente y la susceptibilidad de los suelos a la erosión K_i , en la profundidad de 0-10 cm dentro del perfil del suelo, presentan una correlación lineal simple positiva, con un coeficiente de determinación ($R^{2*} = 0,75$) (Tabla 8), indicando que a mayor densidad aparente, más susceptibles son los suelos a erosionarse. En la profundidad de 0-60 cm, no se presenta correlación entre dichas propiedades (Tabla 8).

La densidad aparente, presenta correlaciones altamente significativas con: Porosidad total (Pt) ($r = -1$ y $R^{2**} = 1$) en las profundidades de 0-10 y 0-60 cm (Tablas 9 y 10), espacio poroso lleno de aire (Ea) ($r = -0,95$ y $R^{2**} = 0,90$), y distribución en seco de agregados mayores de 6 mm de diámetro promedio (DSAG>6) ($r = 0,96$ y $R^{2**} = 0,92$ y $r = 0,95$ y $R^{2**} = 0,90$), para profundidades entre 0-10 y 0-60 cm respectivamente, y humedad gravimétrica a 0,033 MPa ($Hg_{0,033MPa}$) ($r = -0,97$ y $R^{2**} = 0,94$), distribución en seco de agregados entre 2 a 1 mm (DSAG2-1) ($r = -0,95$ y $R^{2**} = 0,90$) y distribución en seco de agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro promedio (DSAG1-0,5) ($r = -0,99$ y $R^{2**} = 0,98$) en la profundidad de 0-60 cm (Tabla 10).

Densidad real (D_r): El valor más bajo de densidad real se presenta en la unidad Fresno ($2,17 \text{ g cm}^{-3}$), presentando diferencias altamente significativas con los demás suelos, aunque entre estos no hubo diferencias significativas (Tabla 6). Esto se debe a la presencia alta de materia orgánica (MO) en dicha unidad, especialmente en la profundidad de 0 a 10 cm. A través de la profundidad del perfil del suelo (0-60 cm), no se presentan diferencias altamente significativas entre unidades de suelos (Tabla 9).

Porosidad total (Pt): Esta propiedad en promedio, no presenta diferencias altamente significativas entre las unidades de suelos Chinchiná (65,41 %) y Montenegro (68,87 %). Las unidades Chinchiná (65,41 %) y Fresno (72,75 %), presentan diferencias altamente significativas entre sí. Las unidades Guamal (37,29 %) y Parnaso (54,59 %), presentan diferencias altamente significativas entre sí y con las demás unidades de suelos. Los valores más bajos de porosidad total, se dan en la unidad Guamal y los más altos en la Fresno. A través del perfil del suelo, en la profundidad de 20 a 40 cm, se presenta un aumento significativo en la porosidad total (Tabla 6). La porosidad total en la profundidad de 0-10 cm, está relacionada con la susceptibilidad de los suelos a la erosión K_i , con coeficiente de correlación lineal negativo y de determinación $R^{2*} = 0,76$ (Tabla 3), indicando que a mayor porosidad total, será menor la susceptibilidad de un suelo a erosionarse y viceversa. Esta correlación no se presenta en la profundidad promedio de (0-60 cm) (Tabla 8).

Espacio aéreo o espacio poroso lleno de aire (Ea): Las unidades Chinchiná, Montenegro y Fresno, presentan los valores promedio más altos de espacio aéreo (49,0, 48,3 y 47,7 % respectivamente), no existiendo diferencias altamente significativas entre ellas. Los valores promedio más bajos están en las unidades Guamal (32,3 %) y Parnaso (41,3 %), con diferencias altamente significativas entre si y con las otras unidades de suelos. A través de la profundidad del perfil del suelo no se presentan diferencias significativas (Tabla 6). El espacio poroso lleno de aire, aunque no presenta correlación importante con la erodabilidad de los suelos K_i , si esta muy correlacionado con el índice de estabilidad de la agregación (IE) ($r = -0,98$ y $R^{2**} = 0,96$), únicamente en la profundidad promedio de 0-60 cm (Tabla 10), el cual si está relacionado con la erodabilidad (Tabla 7).

Conductividad hidráulica (PERM): La unidad Chinchiná con conductividad hidráulica de $3,79 \text{ cmh}^{-1}$, presenta diferencias altamente significativas con las unidades Montenegro ($7,78 \text{ cmh}^{-1}$), Fresno ($5,73 \text{ cmh}^{-1}$), Guamal ($0,53 \text{ cmh}^{-1}$) y Parnaso ($0,95 \text{ cmh}^{-1}$). Las Unidades Guamal y Parnaso, no presentan diferencias significativas entre sí. Los valores más altos, están en la unidad Montenegro ($7,78 \text{ cmh}^{-1}$) y el valor promedio más bajo en la unidad Guamal ($0,53 \text{ cmh}^{-1}$), seguido por la Parnaso ($0,95 \text{ cmh}^{-1}$) (Tabla 6). Al analizar en la Tabla 6 los valores de conductividad hidráulica para estas dos últimas unidades a través del perfil del suelo, se observa en ambas unidades, una reducción drástica de la conductividad hidráulica a partir de los primeros 10 cm de profundidad, siendo mayor esta reducción en la unidad Parnaso. Esto hace que en épocas muy lluviosas, con aguaceros de intensidad y duración altas, se presente una discontinuidad en el movimiento del agua a través del perfil del suelo, ocasionando saturación del terreno en los primeros 20 a 40 cm y como resultado los movimientos masales, especialmente en suelos cultivados con monocultivos de sistemas radicales poco profundos (0-30 cm de profundidad). Este proceso degradativo es mayor en la unidad Parnaso. Por tanto, la vocación de uso de estos suelos, son los sistemas Forestales, Agroforestales, Silvopastoriles y Agrosilvopastoriles.

Tabla 9 Coeficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación R² entre diferentes propiedades físicas promedio de cinco suelos de la zona cafetera colombiana, tres usos de suelo (bosque, café y pastos) de 0 a 10 cm de profundidad.

Factores Variables	Da	Dr	Ea	Pt	ADISP	RP	RTC	PERM
RP	r	0,98	-0,95		-0,93			
	R ²	0,96**	0,91**		0,87*			
Ar	r		-0,94		-0,96	-0,94	-0,93	
	R ²		0,88*		0,92**	0,88**	0,87**	
L	r				0,92		0,98	
	R ²				0,85*		0,97**	
A	r	-0,91	0,96		0,95	-0,97	0,88	
	R ²	0,84*	0,93**		0,90**	0,95**	0,78*	
AG0,5-0,25CA	r	0,89						
	R ²	0,80*						
AG<0,25CA	r	0,91						
	R ²	0,82*						
AAG<0,25	r	0,90						
	R ²	0,81*						
AG0,5-0,25SA	r	0,92				0,88		
	R ²	0,84*				0,78*		
AG<0,25SA	r	0,89						
	R ²	0,80*						
PDPAG0,5-0,25	r	0,89						
	R ²	0,80*						
PDPAG<0,25	r	0,90						
	R ²	0,82*						
A>1	r	0,88						
	R ²	0,77*						
A0,25-01	r	-0,88				-0,97	0,92	
	R ²	0,77*				0,94**	0,85*	
A<0,05	r	0,89						
	R ²	0,79*						
Pt	r	-1,00	0,89		0,88			
	R ²	0,99**	0,79*		0,77*			
Hg0,033MPa	r	-0,93	-0,91	0,92		-0,88	0,87	
	R ²	0,87*	0,83*	0,85*		0,77*	0,76*	
Ea	r	-0,89		0,89		-0,95		
	R ²	0,80*		0,79*		0,91**		
DSAG>6	r	0,96	-0,94	-0,96	-0,95			-0,88
	R ²	0,92**	0,89*	0,92**	0,90**			0,78*
Da	r		-0,89	-1,00		0,98		
	R ²		0,80*	0,99**		0,96**		
DSAG2-1	r		0,88			-0,95		
	R ²		0,78*			0,91**		
DSAG1-0,5	r		0,91		0,93			
	R ²		0,83*		0,87*			
DSAG0,5-0,25	r		0,91					
	R ²		0,82*					
DSAG0,25-01	r		0,91		0,96			
	R ²		0,82*		0,91**			
DSAG<0,1	r		0,95		0,94	-0,96	0,88	
	R ²		0,91**		0,89*	0,93**	0,77*	
ADISP	r		0,88			-0,93	0,91	0,91
	R ²		0,77*			0,87*	0,83*	0,84*

P > F < 0,05: Significativo** P > F < 0,01: Altamente significativo

RP: Resistencia promedio a la penetración, Ar: contenido de arcilla, L: contenido de limo, A: contenido de arena, AG0,5-0,25CA: agregados entre 0,5 y 0,25 mm de diámetro con arenas, AG<0,25CA: agregados menores de 0,25 mm de diámetro con arenas, AAG<0,25: arenas en los agregados menores de 0,25 mm de diámetro, AG0,5-0,25SA: agregados entre 0,5 y 0,25 mm de diámetro sin arenas, AG<0,25SA: agregados menores de 0,25 mm de diámetro sin arenas, PDPAG0,5-0,25: peso diámetro promedio de agregados entre 0,5 y 0,25 mm de diámetro, PDPAG<0,25: peso diámetro promedio de agregados menores de 0,25 mm de diámetro, A>1: arenas mayores de 1 mm de diámetro, A0,25-01: arenas entre 0,25 y 0,1 mm de diámetro, A<0,05: arenas menores de 0,05 mm de diámetro, Pt: porosidad total, Hg0,033MPa: humedad gravimétrica a 0,033 MPa, Ea: espacio aéreo, DSAG>6: distribución en seco de agregados mayores de 6 mm de diámetro, Da: densidad aparente, DSAG2-1: distribución en seco de agregados entre 2 y 1 mm de diámetro, DSAG1-0,5: distribución en seco de agregados entre 1 y 0,5 mm de diámetro, DSAG0,5-0,25: distribución en seco de agregados entre 0,5 y 0,25 mm de diámetro, DSAG0,25-01: distribución en seco de agregados entre 0,25 y 0,1 mm de diámetro, DSAG<0,1: distribución en seco de agregados menores de 0,1 mm de diámetro, ADISP: agua disponible.

Tabla 9 Coeficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación R² entre diferentes propiedades físicas promedio de cinco suelos de la zona cafetera colombiana, tres usos de suelo (bosque, café y pastos) de 0 a 10 cm de profundidad (continuación).

Factores Variables	Da	Dr	Ea	Pt	ADISP	RP	RTC	PERM
PERM	r				0,91			
	R ²				0,84*			
RTC	r				0,91			
	R ²				0,83*			
A1-0,5	r					-0,99	0,90	
	R ²					0,98**	0,80*	
A0,5-0,25	r					-0,98	0,92	
	R ²					0,96**	0,85*	
Hgpc	r					-0,87		
	R ²					0,76*		
AAG>2	r						0,94	
	R ²						0,89**	
EA	r							-0,96
	R ²							0,92**

PERM: conductividad hidráulica, RTC: resistencia al cortante tangencial, A1-0,5: arenas entre 1 a 0,5 mm de diámetro, A0,5-0,25: arenas entre 0,5 y 0,25 mm de diámetro, Hgpc: humedad gravimétrica al momento de la prueba de resistencia a la penetración y al cortante tangencial, AAG>2: arenas en los agregados mayores de 2 mm de diámetro, EA: estabilidad de la agregación, RP: Resistencia a la penetración promedio.

Tabla 10. Coeficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación R² entre diferentes propiedades físicas promedio de cinco suelos de la zona cafetera colombiana, tres usos de suelo (bosque, café y pastos) de 0 a 60 cm de profundidad

Factores Variables	Da	Dr	Ea	Pt	ADISP	PERM	RP
Ar	r			-0,87			
	R ²			0,76*			
A	r	-0,89	0,88	0,89			-0,89
	R ²	0,79*	0,78*	0,79*			0,79*
AG2-1CA	r	0,93	-0,99	-0,95			0,91
	R ²	0,86*	0,98**	0,90**			0,83*
AG1-0,5CA	r	0,94	-0,99	-0,96			0,92
	R ²	0,88*	0,98**	0,92**			0,84*
AG<0,25CA	r	0,91	-0,97	-0,93			0,90
	R ²	0,83*	0,94**	0,87**			0,81*
AAG0,5-0,25	r	0,88	-0,93	-0,90			
	R ²	0,77*	0,87*	0,81*			
AAG<0,25	r	0,90	-0,95	-0,92			0,89
	R ²	0,81*	0,90**	0,84*			0,79*
AG2-1SA	r	0,93	-1,00	-0,95			0,91
	R ²	0,86*	1,00**	0,91**			0,83*
AG1-0,5SA	r	0,94	-1,00	-0,96			0,92
	R ²	0,88*	1,00**	0,93**			0,85*
AG0,5-0,25SA	r	0,92	-0,99	-0,96			
	R ²	0,84*	0,98**	0,92**			
AG<0,25SA	r	0,92	-0,97	-0,94			
	R ²	0,84*	0,95**	0,88*			
IE	r	0,93	-0,98	0,95			
	R ²	0,87*	0,96**	0,91**			
PDPAG2-1	r	0,93	-0,99	-0,95			
	R ²	0,86*	0,98**	0,90**			
PDPAG1-0,5	r	0,94	-0,99	-0,96			
	R ²	0,88	0,98**	0,92**			
PDPAG0,5-0,25	r	0,92	-0,98	-0,94			
	R ²	0,85*	0,96**	0,88**			
PDPAG<0,25	r	0,91	-0,97	-0,93			
	R ²	0,83*	0,94**	0,87*			
PDPAG>2	r		0,96	0,89			
	R ²		0,92**	0,79*			
SPDP	r			-0,87			
	R ²			0,76*			

AG2-1CA: agregados entre 2 a 1 mm de diámetro con arenas, AG1-0,5CA: agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro con arenas, AAG0,5-0,25: arenas en los agregados entre 0,5 a 0,25 mm de diámetro, AG2-1SA: agregados entre 2 a 1 mm de diámetro sin arenas, AG1-0,5SA: agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro sin arenas, IE: índice de estructura, PDPAG2-1: peso diámetro promedio de agregados entre 2 a 1 mm de diámetro, PDPAG1-0,5: peso diámetro promedio de agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro, PDPAG>2: peso diámetro promedio de agregados, SPDP: sumatoria peso diámetro promedio de agregados.

Tabla 10. Coeficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación R² entre diferentes propiedades físicas promedio de cinco suelos de la zona cafetera colombiana, tres usos de suelo (bosque, café y pastos) de 0 a 60 cm de profundidad (continuación).

Factores Variables		Da	Dr	Ea	Pt	ADISP	PERM	RP
Ea	r	-0,95			0,97			-0,94
	R ²	0,91**			0,94**			0,88*
Hpgc	r		-0,96		-			-0,98
	R ²		0,91**					0,96**
Da	r			-0,95				
	R ²			0,91**				
Pt	r	-1,00		0,97				-0,99
	R ²	1,00**		0,94**				0,97**
Hg0,033MPa	r			-0,97				
	R ²			0,94**				
DSAG>6	r	0,95		-0,95	-0,95			0,94
	R ²	0,90**		0,90**	0,91**			0,88*
DSAG2-1	r	-0,95		0,92	0,94			-0,95
	R ²	0,90**		0,84*	0,88**			0,90*
DSAG1-0,5	r	-0,99		0,93	0,98			
	R ²	0,98**		0,87*	0,97**			
DSAG0,5-0,25	r	-0,93		0,92	0,93			
	R ²	0,86*		0,84*	0,87*			
DSAG0,25-0,1	r			0,90	0,88			
	R ²			0,82*	0,77*			
DSAG<0,1	r			0,88				
	R ²			0,77*				
RP	r			-0,94	-0,99			
	R ²			0,88*	0,98**			
AG>2CA	r			0,96	0,88			
	R ²			0,92**	0,78*			
AG0,5-0,25CA	r			-0,98	-0,94			
	R ²			0,96**	0,89**			
AAG1-0,5	r			-0,92	-0,89			
	R ²			0,84*	0,79*			
A>1	r			-0,91				
	R ²			0,83*				
A<0,05	r			-0,91	-0,88			
	R ²			0,82*	0,78*			
ADISP	r			-0,93	0,91			
	R ²			0,86*	0,83*			
A0,5-0,25	r					0,89		-0,92
	R ²					0,80*		0,84*
A0,25-0,1	r					0,88		
	R ²					0,78*		
AG0,5-0,25CA	r							0,91
	R ²							0,83*
A1-0,5	r							-0,98
	R ²							0,96**

DSAG0,25-0,1: distribución en seco de agregados entre 0,25 y 0,1 mm de diámetro, AG>2CA: agregados mayores de 2 mm con arenas, AAG1-0,5: arenas en los agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro, A0,25-0,1: arenas entre 0,25 a 0,1 mm de diámetro.

La conductividad hidráulica, esta correlacionada en forma negativa en los 0-10 cm de profundidad, con propiedades físicas tales como: estabilidad de la agregación (EA), con coeficientes de determinación R²**= 0,92, indicando que a mayor valor de esta propiedad, será menor la conductividad hidráulica en el suelo (Tabla 9).

Resistencia al cortante tangencial (RTC): Las unidades Chinchiná y Montenegro con resistencia al cortante tangencial promedio de (112,37 kPa y 106,94 kPa, respectivamente), no presentan diferencias altamente significativas entre ellas, pero si con las unidades Fresno (84,97 kPa) Guamal (69,65 kPa) y Parnaso (43,83 kPa), quienes presentan diferencias altamente significativas entre sí y con todas las unidades de suelos estudiadas. Los valores mas altos están en la unidad Chinchiná (112,37 kPa) y los más bajos en Parnaso (43,83) (Tabla 6). Esta es una de las razones por las cuales en suelos de la unidad Parnaso y Guamal, se presentan problemas graves de remociones masales a gran escala, en los períodos muy lluviosos, especialmente cuando el uso del suelo es monocultivo con sistemas radicales superficiales (0-30cm de profundidad), fenómeno que no ocurre o solo se presenta a escala pequeña, cuando los sistemas del uso del suelo son Agroforestales, Agropastoriles, Silvopastoriles.o Agrosilvopastoriles.

Resistencia a la penetración (RESPEN): Las unidades Chinchiná, Montenegro y Fresno, con resistencia a la penetración promedio de (10,18, 9,74 y 6,22 kPa, respectivamente), no presentan diferencias altamente significativas entre sí, pero si con las unidades Guamal (20,28 kPa) y Parnaso (14,38 kPa) que muestran diferencias altamente significativas entre sí y con todas las unidades de suelos estudiadas. Los valores mas

altos están en la unidad Guamal (20,28 kPa), seguida por la Parnaso (14,38 kPa) y los más bajos en la unidad Fresno (6,22 kPa) (Tabla 6). Esto indica, que en suelos como las unidades Chinchiná, Montenegro y Fresno, no es necesario hacer hoyos demasiado grandes para las siembras, lo que si es conveniente en las unidades Guamal y Parnaso.

Índice de estabilidad de la agregación (IE): Las unidades Chinchiná, Montenegro y Fresno, con índice de estabilidad de la agregación promedio de 4,1, 4,18 y 6,84 % respectivamente, no presentan diferencias significativas entre ellas, pero si con las unidades Guamal (55,5%) y Parnaso (17,06 %) que muestran diferencias altamente significativas entre si y con todas las unidades de suelos estudiadas. Los valores mas altos están en la unidad Guamal (55,5 %) y los más bajos en la unidad Chinchiná (4,1 %) (Tabla 6).

El Índice de estabilidad de la agregación, en la profundidad de 0-10 cm, se correlaciona positivamente con la susceptibilidad de los suelos a la erosión (K_i) ($r = 0,96$ y $R^{2**} = 0,92$). A mayor índice de estabilidad de la agregación, mayor susceptibilidad del suelo a la erosión (Tabla 7).

Sumatoria de peso diámetro promedio de agregados del suelo (SPDP): Las unidades Fresno y Parnaso, con Sumatoria de peso diámetro promedio de (5,01 y 5,00 % respectivamente), no presentan diferencias significativas entre ellas, pero si con las unidades Chinchiná (5,39 %), Montenegro (5,19 %) y Guamal (3,93 %), quienes presentan diferencias significativas entre si y con todas las unidades de suelos estudiadas. Los valores mas altos están en la unidad Chinchiná (5,39 %) y los más bajos en la unidad Guamal (3,93 %) (Tabla 6).

La sumatoria de peso diámetro promedio presenta correlación con la susceptibilidad de los suelos a la erosión K_i ($r = -0,91$ y $R^{2*} = 0,82$), a la profundidad promedio de 0-60 cm. Es decir a sumatoria de peso diámetro promedio mayor, la resistencia del suelo a la erosión será menor y viceversa.

Agua disponible para la planta (ADISP): La unidad Chinchiná con agua disponible para la planta de 23,30 %, presenta diferencias altamente significativas con Guamal (8,78 %) y Parnaso (10,57 %). No existen diferencias significativas entre las unidades de suelos Chinchiná, Montenegro y Fresno, ni entre Guamal y Parnaso, pero estas dos últimas, presentan diferencias altamente significativas con las otras unidades de suelos estudiadas. Los valores promedio más altos de agua disponible, se presentan en la unidad Fresno (28,84 %) y los más bajos en la unidad Guamal (8,78 %) (Tabla 6). Lo anterior indica que los cultivos con sistemas radicales muy superficiales establecidos en las unidades de suelo Guamal y Parnaso, se pueden afectar en períodos largos sin lluvias, especialmente en épocas del evento cálido del pacífico conocido popularmente como fenómeno El Niño. Por tanto, es recomendable el establecimiento de los sistemas Forestales, Agroforestales, Agropastoriles o Agrosilvopastoriles en estos suelos.

El agua disponible promedio para la planta, en la profundidad de 0-60 cm está correlacionada positivamente con la materia orgánica ($r = 0,96$ y $R^{2*} = 0,92$) y porcentaje de arenas ($r = 0,95$ y $R^{2*} = 0,91$). Lo que indica, que a mayores contenidos de materia orgánica y de arenas, es mayor el agua disponible para las plantas y viceversa. El contenido de arcilla correlaciona negativamente ($r = -0,94$ y $R^{2*} = 0,89$), por tanto, a mayor contenido de arcilla, menor será el contenido de agua disponible para la planta en el suelo. De ahí la importancia de mantener una cobertura densa y permanente en el suelo, acompañando el sistema de producción, para proteger al máximo la superficie del suelo y con ello la materia orgánica. Por tanto, se debe evitar desnudar estos suelos con desyerbas drásticas, ya sea con azadón o herbicidas aplicados en forma generalizada y reiterada, impedir introducir maquinaria agrícola que conlleve a voltear y enterrar el horizonte orgánico de estos suelos, o su pulverización con el laboreo intensivo. En estos suelos se debe establecer un Programa de Manejo Integrado de Arvenses (Rivera, 1994, 1997a, 1997b 1999b), que permita bajar costos en las desyerbas de los cultivos entre 85 a 92% y dar la protección máxima al suelo contra la erosión con una eficiencia del 95 al 97 %.

Propiedades químicas de cinco suelos de ladera de la Zona Cafetera Colombiana

En la **Tabla 11** se presentan las propiedades químicas de cinco suelos de ladera de la Zona Cafetera Colombiana.

Tabla 11. Propiedades químicas promedio de cinco suelos de ladera de la Zona Cafetera Colombiana, para tres usos y cuatro profundidades de suelo.

		MO	CIC	SBASES	K	Al	Ca	Mg	P	Fe	Mn	Cu	Zn	Ca/Mg
		(%)	cmol(+)/kg					mg/kg						
UNIDAD DE SUELO	Chinchiná	9,82a**	19,75a**	2,03a**	0,11a**	0,40a**	1,64a**	0,28a**	3,00ab**	188,2ab**	12,67a**	5,08a**	2,75a**	7,20a**
	Montenegro	8,84a**	19,92a**	5,10b**	0,30b**	0,23a**	4,11b**	0,68a**	1,58b**	128,5b**	20,25a**	2,42b**	6,50a**	9,60a**
	Fresno	15,95b**	30,42b**	1,17a**	0,18ab**	0,78a**	0,70a**	0,28a**	1,92ab**	155,0ab**	10,58a**	1,08b**	2,33a**	1,47b**
	Guamal	3,67c**	14,58c**	7,52c**	0,23ab**	1,95b**	3,73b**	3,55b**	3,83a**	231,7a**	58,25b**	3,17a**	3,08a**	1,15b**
	Parnaso	5,208c**	29,58b**	1403d**	0,20ab**	0,65a**	7,78c**	6,05c**	1,33b**	225,8a**	104,50c**	8,08c**	4,58a**	1,33b**
PROFUNDIDAD	0-10	13,66a**	26,93a**	8,51a**	0,42a**	0,76a**	5,54a**	2,55a**	5,46a**	270,3a**	59,2a**	5,07a**	8,33a**	3,27a**
	10-20	9,85b**	24,00b**	5,61b**	0,19b**	1,08a**	3,34b**	2,08a**	2,06b**	182b**	37,13b**	4,07ab**	3,53b**	3,97a**
	20-40	6,74c**	20,67c**	4,90b**	0,11b**	0,80a**	2,83b**	1,96a**	1,06b**	147,1b**	35,00b**	3,47ab**	1,73b**	5,02a**
	40-60	4,55c**	19,80c**	4,86b**	0,10b**	0,56a**	2,66b**	2,09a**	0,73b**	143,3b**	33,67b**	3,27b**	1,80b**	4,9a**

Valores identificados con letras distintas presentan diferencia estadística significativa comparados mediante la prueba de Tukey al 5 % (*) o altamente significativa Tukey al 1% (**).

MO: Contenido de Materia Orgánica, CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico, SBASES: Suma de Bases

Materia orgánica: Los valores promedio más altos y con diferencias altamente significativas, se presenta en la unidad Fresno (15,95 %). El valor promedio más bajo está en la unidad Guamal (3,67 %), el cual no tiene diferencia significativa con la Parnaso (5,20 %). En lo profundo del perfil del suelo, se observa un contenido promedio mayor de materia orgánica de 0 a 10 cm para todos los suelos (13,66 %) con diferencias altamente significativas con las demás profundidades. El contenido más bajo (4,55 %), está en la profundidad mayor (40 a 60 cm).

El contenido de materia orgánica (MO), para la profundidad de 0 a 10 cm, esta correlacionada en forma negativa con la densidad real (Dr), con coeficientes de determinación $R^{2**} = 0,98$, indicando que a mayor valor de esta propiedad, menor será el contenido de materia orgánica en el suelo (**Tabla 12**)

El contenido de materia orgánica (MO), esta correlacionada en forma positiva con la humedad gravimétrica obtenida con muestras a 1/3 de atmósferas de presión (0,033MPa), con humedad gravimétrica obtenida al momento de la determinación de la resistencia del suelo a la penetración y cortante tangencial (H_{gpc}) y contenido de arenas entre 1 a 0,5 mm de diámetro promedio (A1-05), con coeficientes de determinación R^2 de 0,92; 0,97 y 0,76 respectivamente (Tabla 12), indicando que a valor mayor en el contenido de materia orgánica en el suelo, así mismo el valor de estas propiedades será mayor y viceversa. En la profundidad de 0-60 cm, se presentan correlaciones con los mismos parámetros, con coeficientes de determinación $R^2 = 0,90$, 0,94 y 0,80, respectivamente (**Tabla 13**).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC): los valores promedio más altos y con diferencias altamente significativas a excepción de la Parnaso, se presenta en la unidad Fresno (30,42 cmol (+) kg⁻¹) (Tabla 11). El valor promedio más bajo está en la unidad Guamal (14,58 cmol (+)kg⁻¹) con diferencia altamente significativa con los otros suelos (Tabla 11). En lo profundo del perfil, se observa un contenido promedio mayor de capacidad de intercambio catiónico de 0 a 10 cm para todos los suelos (26,93 cmol (+) kg⁻¹) con diferencias altamente significativas con las demás profundidades. El contenido más bajo (19,80 cmol (+) kg⁻¹), está en la profundidad mayor (40 a 60 cm) (Tabla 11). La Capacidad de intercambio catiónico, a la profundidad de 0 a 10 cm, presenta correlación lineal con la humedad volumétrica, $r = 0,89$ y de determinación $R^{2*} = 0,80$ (Tabla 12). Lo anterior muestra la necesidad de proteger al máximo estos primeros centímetros del suelo, si se quiere conservar la fertilidad natural de los mismos.

Sumatoria de bases (SBASES): Los valores promedio más altos y con diferencias altamente significativas en relación con las otras unidades de suelos, se presenta en la unidad Parnaso (14,03 cmol (+) kg⁻¹). El valor promedio más bajo está en la unidad Fresno (1,17 cmol (+)kg⁻¹) con diferencia altamente significativa con los otros suelos a excepción de la Chinchiná (Tabla 11). En lo profundo del perfil, se observa un contenido promedio mayor de capacidad de intercambio catiónico de 0 a 10 cm para todos los suelos (8,5 cmol (+) kg⁻¹) con diferencias altamente significativas con las demás profundidades (Tabla 11). El contenido más bajo (4,86 cmol (+) kg⁻¹), está en la profundidad mayor (40 a 60 cm) (Tabla 11). El valor promedio tan bajo de sumatoria de bases que presenta la unidad Fresno (1,17 cmol (+)kg⁻¹) a pesar de tener el contenido más alto de materia orgánica (15,95%) (Tabla 11), se debe a las precipitaciones muy altas durante el año en la zona de estudio (3.627 mm promedio año⁻¹, Tabla 1), al contenido promedio alto de arenas de estos suelos (62,96 %) (Tabla 6) y a su lavado excesivo por lixiviación luego de las desyerbas drásticas con azadón y herbicidas, dejándolos totalmente desnudos (Suarez de Castro y Rodríguez, 1962). Suelos como la unidad Fresno, por sus propiedades físicas y químicas y condiciones climáticas y de pendientes fuertes, se deben manejar con una cobertura densa durante todo el año, que impidan el impacto directo de la lluvia sobre la superficie del suelo y a la vez reduzca la velocidad de las aguas de escorrentía, para protegerlos al máximo de la erosión y lixiviación. La fertilización debe ser fraccionada durante el año, para lo cual se hace necesario realizar investigaciones sobre frecuencias de aplicación de fertilizantes en los diversos cultivos que se establezcan en este tipo de suelos, bajo condiciones climáticas similares.

Contenido de potasio (K): En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Montenegro presenta el valor más alto de potasio (0,30 cmol kg⁻¹), seguido por la unidad Guamal (0,24 cmol kg⁻¹). El valor más bajo está en la unidad Chinchiná (0,11 cmol kg⁻¹), con diferencia altamente significativa con los demás suelos. En lo profundo del perfil, se observa un contenido promedio mayor de potasio de 0 a 10 cm para todos los suelos (0,42 cmol (+) kg⁻¹) con diferencias altamente significativas con las demás profundidades. El contenido más bajo (0,10 cmol (+) kg⁻¹), está en la profundidad mayor (40 a 60 cm) (Tabla 11). Esto muestra la importancia

Tabla 12. Coeficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación (R^2) entre diferentes propiedades físicas y químicas promedio de cinco suelos de la zona cafetera colombiana, tres usos de suelo (bosque, café y pastos) de 0 a 10 cm de profundidad

Factores Variables		MO	CIC	Mg	Mn	Fe	P	Cu
Hgpc	r	0,98						
	R ²	0,97**						
Hg0,03Mpa	r	0,95						
	R ²	0,92**						
Dr	r	-0,99						
	R ²	0,98**						
A1-0,5	r	0,87						
	R ²	0,76*						
A0,25-01	r		0,88					
	R ²		0,77*					
HV	r		0,89					
	R ²		0,80*					
Mn	r			0,99				
	R ²			0,98**				
SBASES	r			0,91	0,93			
	R ²			0,84*	0,87*			
Ar	r			0,96	0,94	-0,90		
	R ²			0,93**	0,89*	0,82*		
L	r			-0,97	-0,96			
	R ²			0,94**	0,92**			
A	r			-0,93	-0,91	-0,90		
	R ²			0,87*	0,83*	0,82*		
RTC	r			-0,95	-0,92			
	R ²			0,90**	0,85*			
ADISP	r			-0,88		-0,98		
	R ²			0,77*		0,96**		
Ea	r			-0,88				
	R ²			0,77*				
DSAG>6	r			0,87		0,92		
	R ²			0,76*		0,84*		
DSAG<0,1	r			-0,94	-0,92			
	R ²			0,89*	0,85*			
A0,5-0,25	r			-0,90			-0,89	
	R ²			0,77*			0,79*	
A0,25-0,1	r			-0,89	-0,89		-0,92	
	R ²			0,79*	0,77*		0,85*	
Da	r					0,87		
	R ²					0,76*		
AG2-1CA	r						0,88	
	R ²						0,78*	
AAG2-1	r						0,94	
	R ²						0,89*	
AAG1-0,5	r						0,91	
	R ²						0,83*	
A<0,05	r						0,88	
	R ²						0,77*	
PDPAG2-1	r						0,88	
	R ²						0,78*	
IE	r						0,87	
	R ²						0,76*	
EA	r							0,88
	R ²							0,78*

A.DISP: agua disponible, **Ea:** espacio aéreo, **DSAG>6:** distribución en seco de los agregados > de 6 mm de diámetro, **RTC:** resistencia al cortante tangencial, **Da:** densidad aparente. **Dr:** densidad real. **AG>2CA:** agregados > de 2 mm con arenas **AG2-1CA** agregados entre 2 y 1 mm de diámetro con arenas, **AG1-0,5CA:** agregados entre 1 y 0,5 mm de diámetro con arenas, **AG0,5 --0,25CA:** agregados entre 0,5 y 0,25 de diámetro con arenas, **AG<0,25CA:** agregados < de 0,25 mm de diámetro con arenas **AAG2-1:** arenas en los agregados entre 2 y 1 mm de diámetro, **AAG1-0,5:** arenas en los agregados entre 1 y 0,5 mm de diámetro, **PDPAG2-1:** peso diámetro promedio de agregados entre 2 y 1 mm de diámetro, **IE:** índice de estabilidad de la agregación, **Ar:** contenido de arcillas **A:** contenido de arenas, **RP:** resistencia promedio a la penetración **Hg0,03Mpa:** humedad gravimétrica a 0,033 Mpa, **Hgpc:** humedad gravimétrica al momento de hacer la prueba de resistencia a la penetración, **HV:** humedad volumétrica **A1-0,5:** arenas entre 1 y 0,5 mm de diámetro, **SPDP:** sumatoria peso diámetro promedio de agregados, **A0,25-01:** arenas entre 0,25 a 0,1 mm de diámetro, **Mn:** manganeso, **SBASES:** suma de bases, **L:** contenido de limos, **DSAG<0,1:** distribución en seco de agregados menores de 0,1 mm de diámetro, **A0,5-0,25:** arenas entre 0,5 a 0,25 mm de diámetro, **A0,25-0,1:** arenas entre 0,25 a 0,1 mm de diámetro, **AAG1-0,5:** arenas en los agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro, **A<0,05:** arenas menores de 0,05 mm de diámetro, **EA:** estabilidad de la agregación

Tabla 13. Coeficientes de correlación lineal simple (r) y de determinación (R^2) entre diferentes propiedades químicas y físicas promedio de cinco suelos de la zona cafetera colombiana, tres usos de suelo (bosque, café y pastos) de 0 a 60 cm de profundidad

Factores Variables		MO	Al	Mg	Mn	Fe	P	Cu
Hgpc	r	0,97						
	R^2	0,94**						
RP	r	-0,92						
	R^2	0,85*						
Da	r	-0,89						
	R^2	0,79*						
Hg0,033	r	0,*95						
	R^2	0,90**						
A1-0,5	r	0,90				-0,90		
	R^2	0,80*				0,81*		
Ar	r			0,95	0,92			
	R^2			0,90**	0,85*			
L	r			-0,94	-0,92			
	R^2			0,89*	0,85*			
A	r			-0,93	-0,91	-0,89		
	R^2			0,86*	0,83*	0,79*		
Ea	r		-0,92					
	R^2		0,84*					
ADISP	r	0,96		-0,88				
	R^2	0,92*		0,76*				
PERM	r					-0,99		
	R^2					0,98**		
EA	r							0,91
	R^2							0,83*
HV	r							0,95
	R^2							0,90**
AG>2CA	r		-0,97					
	R^2		0,94**					
AG2-1CA	r		0,96					
	R^2		0,92**					
AG1-0,5CA	r		0,95					
	R^2		0,90**					
AG0,5-0,25CA	r		0,96					
	R^2		0,92**					
AG<0,25CA	r		0,96					
	R^2		0,92**					
AAG2-1	r		0,88					
	R^2		0,77**					
AAG1-0,5	r		0,96					
	R^2		0,92**					
AAG0,5-0,25	r		0,96					
	R^2		0,92**					
AAG<0,25	r		0,95					
	R^2		0,90**					
AG2-1SA	r		0,94					
	R^2		0,88*					
AG1-0,5SA	r		0,94					
	R^2		0,88*					
AG0,5-0,25SA	r		0,95					
	R^2		0,90**					
AG<0,25SA	r		0,97					
	R^2		0,94**					
PDPAG>2	r		-0,97					
	R^2		0,95**					
PDPAG2-1	r		0,96					
	R^2		0,92**					
PDPAG1-0,5	r		0,96					
	R^2		0,92**					
PDPAG<0,25	r		0,96					
	R^2		0,92**					
SPDP	r		-0,97					
	R^2		0,94**					
A>1	r		0,95					
	R^2		0,90**					
A0,5-0,25	r		0,96	-0,88		-0,93		
	R^2		0,92**	0,77*		0,87*		
A0,25-0,1	r		-0,88	-0,88		-0,91		
	R^2		0,77*	0,78*		0,83*		
A<0,05	r		0,95					
	R^2		0,90**					
IE	r		0,96					
	R^2		0,92**					
DSAG>6	r					0,89		
	R^2					0,79*		
DSAG<0,1	r			-0,89				
	R^2			0,79*				

de proteger estos primeros 10 cm del suelo contra la erosión con coberturas vegetales densas, mediante un Programa de Manejo Integrado de Arvenses (Rivera, 1994, 1997a, 1997b, 1999b)

Contenido de aluminio (Al): En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Guamal presenta los valores más altos de Al, seguida de la Fresno con contenidos de 1,95 y 0,78 cmol kg^{-1} respectivamente. El valor más bajo está en la unidad Montenegro (0,23 cmol kg^{-1}) (Tabla 11).

El aluminio en la profundidad de 0 a 60 cm (Tabla 13), presenta correlación lineal simple significativa con espacio poroso lleno de aire (E_a) ($r = -0,92$ y $R^{2*} = 0,84$), agregados mayores de 2 mm de diámetro promedio con arenas ($AG > 2CA$) ($r = -0,97$ y $R^{2**} = 0,94$), agregados entre 2-1 mm de diámetro promedio con arenas ($AG2-1CA$) ($r = 0,96$ y $R^{2**} = 0,92$), agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro promedio con arenas ($AG1-0,5CA$) ($r = 0,95$ y $R^{2**} = 0,90$), agregados entre 0,5 a 0,25 mm de diámetro promedio con arenas ($AG0,5-0,25CA$) ($r = 0,96$ y $R^{2**} = 0,92$), agregados menores de 0,5 mm de diámetro promedio con arenas ($AG < 0,25CA$) ($r = 0,96$ y $R^{2**} = 0,92$), agregados entre 2-1 mm de diámetro promedio sin arenas ($AG2-1SA$) ($r = 0,94$ y $R^{2*} = 0,88$), agregados entre 1-0,5 mm de diámetro promedio sin arenas ($AG1-0,5SA$) ($r = 0,94$ y $R^{2*} = 0,88$), agregados entre 0,5-0,25 mm de diámetro promedio sin arenas ($AG0,5-0,25SA$) ($r = 0,95$ y $R^{2**} = 0,90$), y agregados $< 0,25$ mm de diámetro promedio sin arenas ($AG < 0,25SA$) ($r = 0,97$ y $R^{2**} = 0,94$), índice de estructura (IE) ($r = 0,96$ y $R^{2**} = 0,92$) y sumatoria del peso diámetro promedio ($r = -0,97$ y $R^{2**} = 0,94$).

Contenido de Calcio (Ca): En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Parnaso presenta el valor más alto de Ca (7,78 cmol kg^{-1}) con diferencia altamente significativa, seguido por la unidad Guamal (3,73 cmol kg^{-1}). El valor más bajo está en la unidad Fresno (0,70 cmol kg^{-1}). En lo profundo del perfil, se observa un contenido promedio mayor de calcio de 0 a 10 cm para todos los suelos (5,54 cmol (+) kg^{-1}) con diferencias altamente significativas con las demás profundidades. El contenido más bajo (2,66 cmol (+) kg^{-1}), está en la profundidad mayor (40 a 60 cm) (Tabla 11).

Contenido de Magnesio (Mg): En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Parnaso presenta los valores más altos de Mg, seguida por la unidad Guamal con contenidos de 6,05 y 3,55 cmol kg^{-1} con diferencia altamente significativa, respectivamente. El valor más bajo está en la unidad Chinchiná (0,28 cmol kg^{-1}). En lo profundo del perfil, se observa un contenido promedio mayor de magnesio de 0 a 10 cm para todos los suelos (2,55 cmol (+) kg^{-1}) aunque no se presentaron diferencias significativas. El magnesio, en la profundidad de 0 a 10 cm, presenta correlación lineal negativa con el agua disponible para la planta y para el espacio poroso lleno de aire $r = -0,88$, $R^{2**} = 0,77$, y $r = -0,88$, $R^{2*} = 0,77$ respectivamente. Es decir a mayor contenido de magnesio en el suelo, menor será el agua disponible del mismo y el espacio poroso lleno de aire y viceversa. También hay correlación lineal simple altamente significativa con la resistencia al cortante tangencial $r = -0,95$ y $R^{2**} = 0,90$ (Tabla 12), indicando que a mayor contenido de magnesio, los suelos son más susceptibles a los movimientos masales y viceversa. Estos movimientos masales se pueden prevenir con sistemas de producción agroforestales, silvopastoriles o agrosilvopastoriles. Las áreas afectadas, se pueden estabilizar y recuperar en forma eficiente y a costos bajos mediante sistemas bio-ingenieriles (Rivera 1998, 1999c)

Relación Calcio Magnesio (Ca/Mg): En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Montenegro presenta los valores más altos de Ca/Mg (9,8), seguido por la unidad Chinchiná (7,21), sin diferencias significativas. El valor más bajo se presenta en la unidad Guamal (1,15). Entre profundidades del perfil, no se presentan diferencias significativas de Ca/Mg. No se encontró correlación importante entre Ca/Mg y las demás propiedades físicas y químicas evaluadas, ni influencia sobre la susceptibilidad de los suelos a la erosión (Tabla 11).

Contenido de Fósforo (P): En promedio para cada unidad de suelo la unidad Guamal presenta los valores más altos de P, seguido de la unidad Chinchiná, con contenidos de 3,83 y 3,0 mg kg^{-1} respectivamente, sin diferencias significativas. El valor más bajo se presenta en la unidad Parnaso (1,33 mg kg^{-1}). En lo profundo del perfil, se observa un contenido promedio mayor de fósforo de 0 a 10 cm para todos los suelos (5,46 mg kg^{-1}) con diferencias altamente significativas con las demás profundidades. El contenido más bajo (0,73 mg kg^{-1}), está en la profundidad mayor (40 a 60 cm) (Tabla 11). El fósforo presenta a la profundidad de 0 a 10 cm, correlación lineal simple significativa con agregados entre 2 a 1 mm de diámetro promedio con arenas

(AG2-1CA) ($r = 0,88$ y $R^{2*} = 0,78$) e índice de estabilidad (IE) ($r = 0,87$ y $R^{2*} = 0,76$) (Tabla 12). Este último parámetro está muy relacionado positivamente con la erodabilidad de los suelos K_i (Tabla 7).

Contenido de hierro: En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Guamal presenta los valores más altos de Fe, seguido de la unidad Parnaso con contenidos de 231,7 y 225,8 mg kg^{-1} respectivamente, entre los cuales no hubo diferencias significativas. El valor más bajo se presenta en la unidad Montenegro (128,5 mg kg^{-1}), presentando diferencias altamente significativas con Guamal y Parnaso. En lo profundo del perfil, se observa un contenido promedio mayor de hierro en la profundidad de 0 a 10 cm para todos los suelos (270,3 mg kg^{-1}) con diferencias altamente significativas con las demás profundidades. El contenido más bajo (143,3 mg kg^{-1}), está en la profundidad mayor (40 a 60 cm) (Tabla 11). El hierro presenta a la profundidad de 0 a 10 cm, correlación lineal simple altamente significativa con agua disponible ($r = -0,98$ y $R^{2**} = 0,96$), densidad aparente ($r = 0,87$ y $R^{2*} = 0,76$) y distribución en seco de agregados mayores de 6 mm de diámetro promedio ($r = 0,92$ y $R^{2*} = 0,84$) (Tabla 12).

Contenido de Manganeseo (Mn): En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Parnaso presenta los valores más altos de Mn, seguido de la unidad Guamal con contenidos de 104,5 y 58,25 mg kg^{-1} respectivamente, con diferencias altamente significativas. El valor más bajo se presenta en la unidad Fresno (10,58 mg kg^{-1}). En lo profundo del perfil, se observa un contenido promedio mayor de manganeseo de 0 a 10 cm para todos los suelos (59,2 mg kg^{-1}) con diferencias altamente significativas con las demás profundidades. El contenido más bajo (33,67 mg kg^{-1}), está en la profundidad mayor (40 a 60 cm) (Tabla 11). El Mn presenta a la profundidad de 0 a 10 cm, correlación lineal simple significativa con distribución en seco de agregados menores de 0,1 mm de diámetro promedio (DSAG<0,1) ($r = -0,92$ y $R^{2*} = 0,85$) y resistencia al cortante tangencial (RTC) ($r = -0,92$ y $R^{2*} = 0,85$). Esta última correlación indica, que suelos con contenidos altos de manganeseo, presentar susceptibilidad alta a los movimientos masales y viceversa (Tabla 11).

Contenidos de Cobre (Cu): En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Parnaso presenta los valores más altos de Cu (8,08 mg kg^{-1}), seguido por la unidad Chinchiná (5,08 mg kg^{-1}), con diferencias altamente significativas. El valor más bajo se presenta en la unidad Fresno (1,08 mg kg^{-1}). En lo profundo del perfil, se observa un contenido promedio mayor de cobre de 0 a 10 cm para todos los suelos (5,07 mg kg^{-1}) con diferencias altamente significativas con la profundidad de 0-40 cm. El contenido más bajo (3,27 mg kg^{-1}), está en la profundidad mayor (40 a 60 cm) (Tabla 11). El cobre presenta a la profundidad de 0 a 10 y de 0 a 60 cm, correlación lineal simple significativa con la estabilidad de la agregación (EA) ($r = 0,88$ y $R^{2*} = 0,78$) (Tabla 12) y ($r = 0,91$ y $R^{2*} = 0,83$) (Tabla 13) respectivamente.

Contenido de Zinc (Zn): En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Montenegro presenta los valores más altos de Zn (6,5 mg kg^{-1}), seguido por la unidad Guamal (3,08 mg kg^{-1}), sin diferencias significativas. El valor más bajo está en la unidad Fresno (2,33 mg kg^{-1}), sin diferencias significativas con las demás unidades. En lo profundo del perfil, se observa un contenido promedio mayor de zinc de 0 a 10 cm para todos los suelos (8,33 mg kg^{-1}) con diferencias altamente significativas con la profundidad de 0-40 cm. El contenido más bajo (1,80 mg kg^{-1}), está en la profundidad mayor (40 a 60 cm) (Tabla 11). No se encontró correlación alguna entre el zinc con la erodabilidad y las propiedades físicas estudiadas.

En términos generales, se puede observar que en los primeros 0-10 cm de profundidad de los suelos, se encuentra la fertilidad natural mayor de los mismos y por tanto, todas las prácticas preventivas de conservación, deben ir dirigidas a proteger esta primera capa del perfil del suelo.

Uso, Manejo y Conservación de los suelos

En la **Tabla 14**, se presenta las recomendaciones de uso, manejo y conservación de cada una de las unidades de suelos estudiadas, acorde con sus propiedades físicas y químicas y su susceptibilidad a la degradación por erosión y movimientos masales.

Determinación de ecuaciones para la predicción de la erodabilidad K_i del WEPP y K de la USLE de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana.

Tabla 14. Uso, manejo y conservación recomendables para cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana.

UNIDAD DE SUELO	USO	MANEJO	CONSERVACIÓN
Chinchiná, <i>Melanudands</i>	Café variedad Colombia a libre exposición solar.	Siembra directa de cafetos en hoyos de 30 cm x 30 cm x 30 cm. Siembra a través de la pendiente. Densidades de siembra alta (5000 a 10000 p/ha). Manejo Integrado de Arvenses, plagas y enfermedades. Fertilización oportuna y conveniente según análisis de suelos	No remoción de suelo con azadón ni maquinaria agrícola. Mantener coberturas nobles de cubrimiento denso permanente todo el año. Mulch en la zona de raíces del cafeto. No aplicación generalizada y reiterada de herbicidas. Distribución de ramilla de cafetos renovados por zoca.
Montenegro, <i>Melanudands</i>	Idem	Idem	Idem
Fresno, <i>Melanudands</i>	Idem	Idem . Aumentar la frecuencia de la fertilización (6 veces al año)	Idem
Guamal, <i>Typic eutropepts</i>	Café variedad colombía bajo sombrío regulado (Sistema Agroforestal).	Siembra directa del cafeto en hoyos de 40 cm x 40 cm x 40 cm. Densidades de siembra alta (Mayor de 5000 p/ha) Manejo Integrado de Arvenses, plagas y enfermedades. Fertilización oportuna y conveniente según análisis de suelos. Establecimiento de árboles de sombrío con sombra regulada (realce mediante corte de ramas laterales), para mayor anclaje del terreno	Mantener coberturas nobles de cubrimiento denso en forma permanente durante todo el año, barreras vivas de limoncillo (<i>Cymbopogon citratus</i>) o Vetiver (<i>Vetiveria zizanioides</i>) a través de la pendiente del terreno. Maneje de aguas superficiales y subsuperficiales (obras de drenaje).
Parnaso, <i>Typic eutropepts</i>	Idem	Idem	Idem

Observaciones: Las cinco unidades de suelo pueden ser usadas por diferentes cultivos adaptados a las condiciones agroecológicas de la zona cafetera, para lo cual se deben seguir los criterios de manejo y conservación recomendados para café.

Se determinaron 10 ecuaciones, que permiten predecir la erodabilidad K_i del WEPP y K de la USLE de cinco unidades de suelos de la Zona Cafetera Colombiana (**Tabla 15**), las cuales fueron obtenidas mediante correlaciones y regresiones múltiples entre los 71 parámetros físico - químicos determinados y los factores de erodabilidad (SAS Institute INC. 1993; Rivera, 1999a).

Con las 10 ecuaciones propuestas, se dan alternativas diferentes, que permiten predecir en forma rápida y sencilla el factor erodabilidad de los suelos de la Zona Cafetera Colombiana. Por tanto, para predecir el K de la USLE y K_i del WEPP para cada una de las cinco unidades de suelos estudiadas, se consideran dos ecuaciones, con dos variables, como promisorias de usar. Estas ecuaciones presentan coeficientes de determinación ajustados altos, con R^2 de 1,00 altamente significativo para las variables distribución en seco de agregados entre 4 a 2 mm de diámetro promedio (DSAG4-2) y densidad aparente (D_a).

No obstante, se considera como la más recomendable, para predecir el K_i del WEPP para cada una de las cinco unidades de suelos estudiadas, la ecuación $K_i^2 = 136,7 - 97,83 (AG1-0.5SA) + 16,43 (AG1-0.5SA)^2$ (**Figura 9**). Esta ecuación presenta coeficiente de determinación ajustado alto, con R^2 de 1,00 altamente significativo para una sola variable: agregados sin arenas estables en agua entre 1-0,5 mm de diámetro (AG1-0.5SA).

Para predecir el K de la USLE para cada una de las cinco unidades de suelos estudiadas, se considera como la más recomendable, la ecuación $K^3 = 389E-8 - 39E-7 (AG1-0.5SA) + 685E-9 (AG1-0.5SA)^2$ (**Figura 10**). Esta ecuación presenta un coeficiente de determinación ajustado alto, con R^2 de 0,99 altamente significativo para una sola variable: agregados sin arenas estables en agua entre 1-0,5 mm de diámetro (AG1-0.5SA) (Rivera, 1999a).

Tabla 15 Ecuaciones de predicción de la erodabilidad K_i del WEPP y K de la USLE de cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana.

Factores Variables	R^2 Ajustado	Significancia Modelo $Pr > F $	CV Modelo	Ecuación de Predicción
1. DSAG4-2 Da	1,00	0,0017**	0,32	$1/K^3 = -154E6 + 2,99E7 (Da) + 9,03E6 (DSAG4-2) - 162E4 (Da \times DSAG4-2)$
2. DSAG4-2 Da	1,00	0,0144**	0,67	$1/\sqrt{K_i} = -0,756 + 0,626 (Da) + 0,0704 (DSAG4-2) - 0,046 (Da \times DSAG4-2)$
3. AG1-0,5SA	0,99	0,0030**	15,77	$K^3 = 389E-8 - 39E-7 (AG1-0.5SA) + 685E-9 (AG1-0.5SA)^2$
4. AG1-0,5SA	1,00	0,0019**	10,18	$K_i^2 = 136,7 - 97,83 (AG1-0.5SA) + 16,43 (AG1-0.5SA)^2$
5. AAG<0,25	0,97	0,0013**	34,47	$K^3 = -41E-7 + 217E-7 (AAG<0.25)$
6. AAG<0,25	0,97	0,0161**	15,02	$K_i = 2,7828 + 20,69 (AAG<0.25)$
7. PDPAG1-0,5	0,97	0,0130**	28,80	$K^2 = 0,0002 - 0,015 (PDPAG1-0.5) + 0,261 (PDPAG1-0.5)^2$
8. PDPAG1-0,5	0,99	0,0024**	11,34	$K_i^2 = 142,6 - 9836 (PDPAG1-0.5) + 179680 (PDPAG1-0.5)^2$
9. AG1-0,5CA	0,99	0,0023**	13,97	$K^3 = 453E-8 - 31E-7 (AG1-0.5CA) + 427E-9 (AG1-0.5CA)^2$
10. AG1-0,5CA	0,99	0,0023**	11,31	$K_i^2 = 142,6 - 73,84 (AG1-0.5CA) + 10,12 (AG1-0.5CA)^2$

DSAG4-2: Distribución de Agregados en seco entre 4 y 2 mm (%). Da: Densidad aparente (g/cm^3). AG1-0,5SA: Agregados entre 1-0.5mm sin arenas (%). AAG<0,25: Contenido de arenas en los agregados < 0.25mm, (%). PDPAG1-0,5: Peso diámetro promedio de agregados entre 1-0.5mm (%). AG1-0,5CA: Agregados entre 1-0.5mm con arenas (%). (**) Altamente significativo estadísticamente.

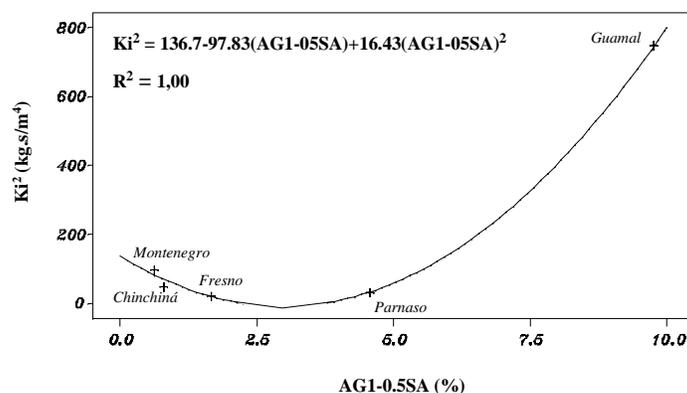


Figura 9. Función polinomial de segundo grado entre el factor erodabilidad del WEPP (K_i) y agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro promedio sin arenas (AG1-0.5 SA).

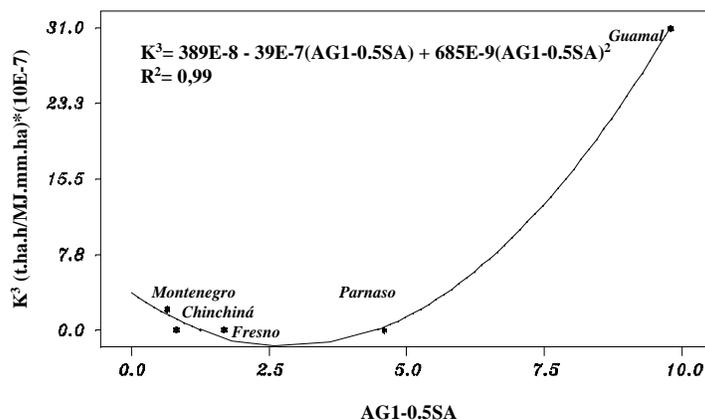


Figura 10. Función polinomial de segundo grado entre el factor erodabilidad de la USLE (K) y agregados entre 1 a 0,5 mm de diámetro promedio sin arenas (AG1-0.5 SA).

Se recomiendan aquellas ecuaciones que presenten el número menor de variables, más fáciles de determinar y a costo menor, además de un coeficiente de determinación alto y altamente significativa.

CONCLUSIONES

En los suelos derivados de cenizas volcánicas, Consociaciones Chinchiná, Montenegro y Fresno (*Melanudands*) y en la Unidad Parnaso, (*Typic eutropepts*) predomina el flujo de agua de percolación, lo cual favorece el almacenamiento del agua en el suelo.

Todos los suelos estudiados, presentan la tendencia a incrementar el flujo de escorrentía y a disminuir el flujo de percolación, cuando el tamaño de agregado del suelo disminuye de 2 mm a < 0,5 mm. Situación que repercute en un almacenamiento bajo de agua en el suelo.

Entre los diferentes procesos de pérdida de suelo por erosión descritos, el que más favorece la erosión, es el salpique o dispersión de agregados por efecto del impacto de la lluvia en el suelo totalmente desnudo, especialmente en los suelos derivados de cenizas volcánicas, *Melanudands*.

La erodabilidad, K_i , más alta, se encuentra en la Unidad Guamal, *Typic eutropepts*, con valores de $13,76 \times 10^6$; $14,39 \times 10^6$ y $53,94 \times 10^6$ kg s m^{-4} , para cada uno de los tamaños de agregados, 2-1; 1-0,5 y < 0,5 mm de diámetro promedio respectivamente, seguido por la Unidad Montenegro, *Melanudands*, con valores de $1,39 \times 10^6$; $3,0 \times 10^6$ y $25,39 \times 10^6$ kg s m^{-4} , para los mismos tamaños de agregados antes mencionados.

Los factores de erodabilidad, K_i , más bajos, se presentan en la Unidad de suelo Fresno, *Melanudands*, con valores de $1,98 \times 10^6$, $3,11 \times 10^6$ y $8,75 \times 10^6$ kg s m^{-4} , para los diferentes tamaños de agregados, 2-1; 1-0,5 y < 0,5 mm respectivamente, seguido por la Unidad Parnaso, *Typic eutropepts*, con valores de $2,05 \times 10^6$, $3,86 \times 10^6$ y $11,5 \times 10^6$ kg s m^{-4} , para los mismos tamaños de agregados descritos anteriormente en forma respectiva.

Los factores de erodabilidad, K_i , más altos, se presentan en la Unidad de suelo Guamal, *Typic eutropepts*, con valores de 0,01, 0,01 y 0,05 $\text{t.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, para los diferentes tamaños de agregados, 2-1; 1-0,5 < 0,5 mm respectivamente, seguido por la Unidad Montenegro, *Melanudands*, con valores de 0,001; 0,003 y 0,02 $\text{t.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, para los mismos tamaños de agregados ya descritos, respectivamente.

Los factores de erodabilidad, K_i , más bajos, se presentan en la Unidad Fresno, *Melanudands*, con valores de 0,002, 0,003 y 0,008 $\text{t.ha.h. MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, para los diferentes tamaños de agregados, 2-1; 1-0,5 y < 0,5 mm respectivamente, seguido por la Unidad Parnaso, *Typic eutropepts*, con valores de 0,002, 0,002 y 0,004 $\text{t.ha.h. MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$, para los mismos tamaños de agregados ya descritos, respectivamente.

Cuando se incrementa el contenido de materia orgánica, el factor de erodabilidad K_i (kg s m^{-4}) decrece, con coeficiente de determinación $R^2 = 0,33$.

Cuando el tamaño de agregado decrece, el factor de erodabilidad K_i se incrementa y así mismo la susceptibilidad de los suelos a la erosión.

En términos generales, se encuentra la Unidad Fresno como el suelo con densidad aparente promedio en el perfil más baja ($0,57 \text{ g cm}^{-3}$), seguida por la Montenegro ($0,57 \text{ g cm}^{-3}$) en relación con las otras Unidades. Las Unidades de suelos con valores de densidad aparente promedio en el perfil más altos son en su orden la Guamal ($1,55 \text{ g cm}^{-3}$) y Parnaso ($1,11 \text{ g cm}^{-3}$).

El contenido promedio de espacio poroso lleno de aire (E_a) más alto para cada unidad de suelo, se presenta en la Unidad Chinchiná (49,0 %), seguido por la Unidad Montenegro (48,3 %) y el valor promedio menor se presenta en la unidad Guamal (32,3 %), seguida la Parnaso (41,3 %).

En promedio para todo el perfil del suelo, los valores más altos de agregados estables al agua < 0,25 mm, se presentan en la unidad Guamal (4,67 %), seguido por la Parnaso (1,21 %). Los valores más bajos están en la unidad Chinchiná (0,24 %), seguida por la Montenegro (0,39 %).

Al nivel de todo el perfil de cada unidad de suelo, la sumatoria más alta de peso diámetro promedio (PDP), se encuentra en la unidad Chinchiná (5,39 %), seguido por la unidad Montenegro (5,20 %). Los valores más bajos están en la unidad Guamal (3,93 %), seguido por la unidad Parnaso (4,95 %).

Al promediar los valores de resistencia a la penetración en el perfil para cada unidad de suelo, se tienen los valores más altos para la unidad Guamal (1988,79 a 2255,53 kPa), seguido por la Parnaso (1410,20 a 1645,56 kPa). Los valores más bajos están en la unidad Fresno (608,01 a 877,69 kPa), seguido por la Montenegro (955,17 a 1229,75 kPa).

En promedio para el perfil del suelo, los valores más altos de resistencia al cortante tangencial, se presentan en la unidad Chinchiná (112,37 kPa), seguido por la unidad Montenegro (106 kPa). Los valores más bajos están en la unidad Parnaso (43,83 kPa), seguido por la unidad Guamal (69,65 kPa).

Para cada Unidad de suelo estudiada, el contenido promedio de agua disponible mas alto (29,5 %), se presenta en la Unidad Fresno, seguido por la Unidad Chinchiná (23,4 %) y el valor promedio menor se presenta en la Unidad Guamal (8,8 %), seguida la Parnaso (10,6%).

Al nivel de todo el perfil del suelo, la conductividad hidráulica promedio más alta (8,27 cm h⁻¹) se encuentra en la unidad Montenegro, seguida por la unidad Fresno (6,06 cm h⁻¹). La conductividad hidráulica promedio más baja esta en la unidad Parnaso (0,94 cm h⁻¹), seguida por la unidad Guamal (1,77 cm h⁻¹).

En promedio de todo el perfil para cada unidad de suelos, la unidad Fresno presenta el contenido más alto de materia orgánica (15,95 %), seguida por la unidad Chinchiná (9,28 %). Los valores más bajos (3,67 %) están en la unidad Guamal.

En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Parnaso presenta los valores de sumatoria de bases (K + Ca + Mg) más altos (14,03 cmol (+) kg⁻¹ g⁻¹), seguido por la unidad Guamal (7,52 cmol (+) kg⁻¹). El valor más bajo se presenta en la unidad Fresno (1,16 cmol (+) kg⁻¹).

En promedio para cada unidad de suelo, la unidad Fresno presenta los valores más altos de CIC, seguido de la unidad Parnaso, con contenidos de 30,4 y 29,6 cmol (+)kg⁻¹ respectivamente. El valor más bajo se presenta en la unidad Guamal (14,6 cmol (+) kg⁻¹).

Se encontró que tanto en la profundidad de 0 a 10 cm dentro del perfil del suelo como el promedio de 0 a 60 cm, las propiedades físicas que más se relacionan con la erodabilidad de los suelos, son los diferentes tamaños de agregados del suelo y el tamaño de las arenas.

Para predecir el K_i del WEPP para cada una de las cinco unidades de suelos estudiadas, se recomienda la ecuación $K_i^2 = 136,7 - 97,83 (AG1-0,5SA) + 16,43 (AG1-0,5SA)^2$, como la más promisoría de usar. Esta ecuación presenta coeficiente de determinación ajustado alto, con R² de 1,00 altamente significativo para la variable agregados sin arenas estables en agua entre 1-0,5 mm de diámetro (AG1-0.5SA).

Para predecir el K de la USLE para cada una de las cinco unidades de suelos estudiadas, se considera la ecuación $K^3 = 389E-8 - 39E-7 (AG1-0,5SA) + 685E-9 (AG1-0,5SA)^2$, como la más promisoría de usar. Esta ecuación presenta coeficiente de determinación ajustado alto, con R² de 0,99 altamente significativo para la variable agregados sin arenas estables en agua entre 1-0,5 mm de diámetro (AG1-0.5SA).

Es importante destacar, que con cinco puntos es muy arriesgado ajustar una curva que tiene tres o cuatro parámetros, siendo necesario estudiar otras unidades de suelos contrastantes.

La parametrización de las variables analizadas en el presente trabajo, permitirá en el futuro realizar programas de planeación de conservación de suelos en las zonas de ladera de Colombia y otras regiones con características similares de suelo, de pendiente y condiciones climáticas.

Para la determinación de los índices de erodabilidad, por precisión y costos, se deben utilizar las variables comprendidas entre los primeros 0 a 10 cm, ya que hacerlo a profundidades mayores, no aportaría resultados importantes en relación con la erodabilidad de los suelos.

RECOMENDACIONES

- La Unidad Guamal debido a las pérdidas altas de suelo por erosión, como consecuencia de la escorrentía alta, indica, la necesidad de un uso, manejo y conservación adecuados, que permitan regular las aguas de escorrentía y favorecer la infiltración y su almacenamiento en el suelo, con usos tales como, bosques de explotación regulada, con sotobosque; caña panelera; café bajo sombrío regulado, con manejo de coberturas nobles; explotación silvopastoril, con una ganadería alternada o de rotación, que evite el sobrepastoreo y con ello la formación de calvas, surcos profundos, terracetas y cárcavas en el terreno.
- Las prácticas contra la erosión y pérdida de agua de escorrentía más recomendables en suelos de la Unidad Guamal son, las coberturas nobles densas, barreras vivas de limoncillo (*Cymbopogon citratus*) sembradas a través de la pendiente del terreno, acequias de ladera, totalmente cubiertas por una cobertura vegetal densa como pastos o maní forrajero (*Arachis pintoi*) que eviten el socavamiento de los taludes y el arrastre de suelo en el fondo del canal.
- En las Unidades de suelos estudiadas y en las Zonas de Ladera Colombiana, se debe evitar el uso del azadón y de la maquinaria agrícola y de los herbicidas aplicados en forma generalizada y reiterada en el control indiscriminado de arvenses y orientarlos hacia un control selectivo de estas, mediante un sistema de Manejo Integrado de Arvenses, que permita mantener una cobertura densa permanente en el terreno durante todo el año, sin competencia al cultivo, de tal forma que eviten la remoción, alteración de la estructura natural del suelo y cambios en la distribución de sus agregados naturales.
- En las Universidades del país y a nivel técnico en general, se debe reorientar la enseñanza de la labranza convencional de suelo mullido, hacia la labranza de conservación, para evitar destruir la bioestructura natural del suelo y acelerar los procesos irreversibles de degradación física, química y biológica.
- Las Universidades del país y especialmente aquellas que cuentan con Facultades relacionadas con el aprovechamiento de los Recursos Naturales, deben jugar un papel importante de proyección hacia la comunidad, mediante la creación de Oficinas de asesoría permanente y gratuita, en la prevención y control de problemas de degradación de los Recursos, conformadas por un grupo profesional interdisciplinario. De esta forma se evitaría un gran número de desastres, tanto en el área Urbana como Rural.
- Se debe hacer mayor énfasis a nivel de la enseñanza universitaria y de los técnicos de extensión en la importancia del Manejo Integrado de Arvenses como la práctica preventiva de la erosión más eficiente (97%) y económica (reducción de costos entre 85 a 92 % en relación con el manejo tradicional) de tal forma que conlleve al manejo Sostenible y Sustentable de los recursos suelo y agua del país y el trópico en general.
- Con base en los resultados y la metodología desarrollada en la presente investigación, se debe realizar un proyecto, con otras unidades de suelos distribuidas por todas las Zonas de Ladera del País y contrastantes en su material de origen, textura y contenido de materia orgánica entre otros. Con esta información acumulada y la obtenida en nuevos proyectos, se podrán ajustar las ecuaciones de predicción de la erodabilidad, desarrolladas para las condiciones de las Zonas de Ladera Colombiana. Las ecuaciones obtenidas, serán validadas y ajustadas en el campo en parcelas de escorrentía, para ser utilizadas posteriormente en determinaciones de la erodabilidad de nuevas unidades de suelos de las Zonas de Ladera Colombiana, en forma directa, rápida, sencilla y a costo bajo hasta lograr tener la información suficiente que permita hacer agrupación de suelos por susceptibilidad a la erosión y generar mapas, con curvas de isoerodabilidad. Estos mapas, permitirán orientar el uso, manejo y conservación de los recursos suelo, agua, dentro de los programas de desarrollo sostenible y de prevención de desastres de los Ministerios de Agricultura, Obras Públicas y Medio Ambiente, Corporaciones Regionales Autónomas del país y la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia

- Se propone complementar el Programa WEEP, mediante estudios de determinación de la Erodabilidad en Surcos, erosividad, grado y longitud de la pendiente, factor cultivo y prácticas preventivas de conservación de suelos..
- En las Zonas de Ladera Colombiana además de los procesos de erosión (lavado y arrastre superficial del suelo), se presentan procesos de degradación por Remociones Masales. Para evitar estos últimos, se debe hacer mayor difusión en cuanto a la vocación del Uso, Manejo y Conservación de los Suelos, teniendo en cuenta su material de origen, ya que dependiendo de éste así mismo deben cambiar los Sistemas de producción. Es el caso de los suelos derivados de Cenizas Volcánicas, profundos y de buena permeabilidad, como las Unidades Chinchiná, Montenegro y Quindío, permiten la siembra de monocultivos de café a libre exposición solar (sin arboles de sombrío), con riesgo mínimo de movimientos masales. Mientras los suelos derivados de materiales metamórficos altamente meteorizados y poco profundos y los sedimentarios con permeabilidad baja como la unidad Guamal, o aquellos que presentan capas poco permeables dentro del perfil del suelo, como la unidad Parnaso, deben ser explotados con Sistemas Agroforestales (café con sombrío regulado), Agropastoriles o Agrosilvopastoriles.
- Si el País desea tener una Agricultura Sostenible y Competitiva a nivel mundial, se debe primero contrarrestar los procesos acelerados de erosión y de remociones masales, ya que de nada valdría contar con muy buenos programas de fertilización ($1,5$ a $3 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y producciones altas, cuando por erosión se pierden hasta $500 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de suelo y con este, el fertilizante aplicado, la fertilidad natural, la biodiversidad florísticas y faunística y el tanque de almacenamiento del agua natural que depende de la profundidad del perfil del suelo.
- El control de los problemas avanzados de erosión y remociones masales en el país y en el trópico, han estado enfocados hacia las soluciones convencionales de la Ingeniería Civil, la cual genera soluciones temporales y muy costosas. Sería por tanto conveniente a nivel de la enseñanza universitaria y de los técnicos de extensión difundir nuevas alternativas, que tengan en cuenta la relación causa – efecto, como son las soluciones bioingenieriles (estructuras totalmente vivas: trinchos vivos, empalizadas vivas y filtros vivos, entre otras) y las biotecnológicas (obras civiles convencionales, complementadas con las soluciones bioingenieriles), las cuales dan soluciones definitivas y de costo bajo en el sentido que la vegetación siempre será más vigorosa y dará mayor protección a través del tiempo.
- En problemas de control de movimientos masales de los suelos de Ladera de la Zona Andina Colombiana, es preferible dar las soluciones mediante obras de drenaje, complementadas con vegetación de sistema radical agresivo como el nacedero o quebrabarrigo (*Trichanthera gigantea*), matarratón (*Gliricidia sepium*) y caña brava (*Gynerium sagittatum*), entre otras, que con muros en concreto, ya que se busca es disminuir la presión de poros del terreno y aumentar la cohesión y el coeficiente de fricción entre partículas del suelo.
- Es conveniente por parte de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y del Instituto Geográfico Agustín Codazzi adelantar estudios de clasificación de suelos hasta la categoría Taxonómica de Serie, para de esta forma tener un conocimiento mayor de los suelos, lo que permitirá hacer extrapolación de resultados y transferencias de tecnología en forma confiable, para Agro-Ecosistemas Tropicales de condiciones similares.
- La susceptibilidad alta de los suelos a la erosión encontrada en el presente trabajo para el Ecosistema Andino Colombiano, debe conducir al Gobierno Nacional al establecimiento de Políticas de aprovechamiento racional de la Tierra, mediante el desarrollo de un Programa Nacional de Conservación de Suelos y Aguas, destinado a mejorar la explotación agrícola en forma sostenible.

Es recomendable que el Estado y los Gremios vinculados a las Zonas de Ladera Andina Colombiana:

- Tengan compromiso mayor en la creación de una Campaña Nacional de Conservación de Suelos y Aguas continuada en el tiempo y en el espacio, de tal forma que circulen los conocimientos y lleguen a toda la comunidad del Territorio Nacional
- Despierten conciencia sobre los problemas de erosión y la necesidad de adoptar medidas para resolverlos.
- Preparen y lleven a la practica, programas de capacitación intensiva e ininterrumpida a largo plazo, a todos los niveles, con un enfoque multidisciplinario.
- Hagan reconocimiento de tierras agrícolas y forestales y evalúen su aptitud de uso y los posibles peligros de degradación, para ofrecer así opciones posibles de aprovechamiento de la tierra, que respondan a las necesidades de la comunidad y aseguren su explotación acorde con sus posibilidades.
- Ofrezcan asesoramiento, asistencia técnica, incentivos, subvenciones, créditos mejores, y exenciones fiscales a agricultores dispuestos a colaborar entre si y con el Gobierno, para lograr en forma mancomunada la Conservación de los Suelos.
- Promuevan a las Entidades Crediticias, a conceder prestamos con preferencia a aquellos agricultores, que tengan sus tierras sometidas a un Plan de Conservación de Suelos.
- Formulen Programas de Investigación, que proporcionen respaldo Científico, para los trabajos prácticos de Conservación de Suelos, teniendo en cuenta las necesidades Socioeconómicas de los agricultores.
- Creen un marco Institucional, para iniciar y supervisar Programas de Conservación de Suelos, para coordinarlos con otras Instituciones interesadas.
- Hagan que el estado reglamente las leyes en materia de Conservación de Suelos, en apoyo de las medidas Administrativas, que hayan de adoptarse.
- La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, cuenta en la actualidad con un buen Servicio de Extensión conformado multidisciplinariamente, el cual debe estar acompañado por técnicos en Conservación de Suelos, para que tengan presente el objetivo final, que es el aumento de la producción Agrícola, sobre una base Sostenible.
- Sería importante, por parte de la Federación Nacional de Cafetero, revivir la Campaña Nacional de defensa y Restauración de Suelos, que se realizó a partir de 1947 hasta 1960.
- La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, debe crear Comités Regionales de Conservación de Suelos, conformados por agricultores entusiastas y con liderazgo en su zona.
- Se debe fomentar la Investigación participativa en Conservación de Suelos, a nivel de campo en todo el país, teniendo en cuenta las inquietudes y propuestas de los agricultores, con miras a lograr una mayor adopción de las practicas preventivas de conservación de suelos, por parte de ellos.

BIBLIOGRAFÍA

- ANAYA G.,M.; MARTINEZ M., MR.; TRUEBA C.,A.; FIGUEROA S., B.; FERNANDEZ M., O. 1977. Manual de Conservación de suelos y del agua. Chapingo (Mexico), Colegio de Postgraduados. 581 p.
- BAJRACHARYA R.M.; ELLIOT W.J.; LAL R. 1992. Interril Erodibility of some Ohio Soils based on field simulation. Soil Sci.Soc.Am.J. 56: 267-272
- BOUYOUCOS G.J. 1927. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soil. Soil Science 23: 343-353..
- BRUCE O, E.; LAL R. 1975. Soil erodibility as determined by raindrop technique. Soil Sci. U.S.A. 119(2):149-157.

- CORDERO A., J.A. 1974. Construcción de un permeámetro de cabeza constante para la determinación de la conducción hidráulica en muestras sin disturbar Palmira (Colombia). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. 56 p. (Tesis de grado).
- ELLIOT W.J.; LAFLEN J.M.; KOHL K.D. 1989 Effect of soil properties on soil Erodibility. ASAE/CSAE Paper # 892150. 24p.
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA (FEDERACAFE). 1975. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE. Chinchiná (Colombia). Manual de conservación de suelos de ladera. 1ª edición. Chinchiná Colombia), Cenicafé. 267 p.
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA (FEDERACAFE). 1982a. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE. Chinchiná (Colombia). Cuarenta años de investigación de Cenicafé. Suelos Vol 1. Chinchiná (Colombia), Cenicafé. 74p.
- FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA(FEDERACAFE). 1982b. PROGRAMA DE DESARROLLO Y DIVERSIFICACION DE ZONAS CAFETERAS Estudio de Zonificación y Uso Potencial del suelo en la zona Cafetera del Departamento de Caldas. Bogota, Colombia. Federacafe-Prodesarrollo. 309 p.
- FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA(FEDERACAFE). 1986. PROGRAMA DE DESARROLLO Y DIVERSIFICACION DE ZONAS CAFETERAS Estudio de Zonificación y Uso Potencial del Departamento del Quindío. Bogotá. Colombia. Federacafé - Prodesarrollo. 162p.
- FORSYTHE, W. 1975. Física de Suelos, Manual de Laboratorio. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José de Costa Rica. 212 p.
- FOSTER G. R.; MCCOOL D.K.; RENARD K.G.; MOLDENHAUER. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. Journal of Soil and Water Conservation. pp 355-359
- FOURNIER, F. 1975. Conservación de Suelos. Mundi Prensa, Madrid, España. 254 p.
- GAVANDE, S.A. 1986. Física de suelos. Principios y aplicaciones. Mexico ed. Limusa, S.A. de C.V. 351 p.
- GOMEZ A., A. 1987. La zona Andina Colombiana. Erosión y Conservación de Suelos. In: Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, 4. Coloquio de la degradación de los suelos en Colombia, 9. Neiva Huila, 18-21 de agosto, 1987. Cenicafé, Chinchiná (Colombia). 34 p..
- GOMEZ A., A.; RIVERA P., H. 1995. Descripción de arvenses en plantaciones de café. Chinchiná (Colombia). Centro Nacional de Investigaciones de café. 490 p.
- GONZALEZ M., A. E. 1983. Anotaciones sobre física de suelos. Fracción teórica. Palmira. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 104 p.
- HERRICK J.E.; LAL R.1995. Soil Physical Property Changes during Dung Decomposition in a Tropical Pasture. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:908-912.
- HUDSON, N. 1982. Conservación de suelos. Barcelona (España). Reverté S.A. 335 p.
- KOGSON Q., J.F. 1988. Análisis de la intensidad, duración y frecuencia de la lluvia en la zona Cafetera colombiana. Manizales (Colombia), Universidad de Caldas. 216 p. (tesis de grado).
- LAFLEN, J.M. 1997. Erosion Prediction for the Next Millennium. Agricultural Research (Estados Unidos) 45 (4): 2.
- LAL R. 1990. Soil Erosión in the Tropics. Principles and Management. United States of America MacGraw Hill,inc. 580 p.
- LAL R. 1994a. Erodibility and Erosivity. p. 141-160. In: Lal R (ed) Soil Erosión Research Methods. Soil Water Conserv.Soc. Ankey. I.A.
- LAL, R. 1994b. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Soil Management Support Services USDA Soil Conservation Service and U.S. Agency for International Development. SMSS Technical Monograph # 21. 78 p.
- MEYER L.D. 1984. Evolution of the Universal Soil Loss Equation. Journal of Soil and Water Conservation. 39(2): 99-138.
- MONTENEGRO H., G.; MALAGON D., C. 1990. Propiedades Físicas de los Suelos. Instituto Geografico Agustin Codaszi (IGAC). Bogotá, D.E. (Colombia). 813 p.
- NEARING M. A., FOSTER G. R., LANE L. J., FINKNER S. C. 1989. A process based soil erosion model for USDA-Water Erosión Prediction Project Technology Transactions of the ASAE. 32(5):1587-1593.
- OLMOS, E. y MONTENEGRO, H. 1987. Inventario de los problemas de la erosión y degradación de los suelos de Colombia. IN: Congreso Colombiaño de la ciencia del suelo, 4 y Coloquio la degradación de los suelos en Colombia, 9. Neiva (Colombia), 18-21 de agosto de 1987. Resúmenes. Neiva, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. p.23.

- PAULET, I.M. 1973. Guía para el planteamiento del uso de las tierras agrícolas en las zonas de lluvias del Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. Departamento de recursos de agua y suelos. Publicación No. 3. 55 p.
- PRIMAVESI A. 1984. Manejo Ecológico del Suelo 5 ed. Buenos Aires (Argentina) "El Ateneo" Pedro García S.A. 499 p..
- RIVERA P., H. 1990. Determinación de los Índices de Erosividad Erodabilidad y Erosión Potencial en la Zona Cafetera Central Colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). Palmira (Colombia). Universidad Nacional de Colombia. (Tesis Máster Science). 310p.
- RIVERA P. 1994. Construya su equipo para aplicación racional de herbicidas y establezca coberturas nobles en su cafetal. Avances Técnicos Cenicafé(Colombia) #206:1-8.
- RIVERA P., H. 1997a. Arvenses y su Interferencia en el Cultivo del Café. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 1997a. 8 p. (Avances Técnicos CENICAFE N° 237).
- RIVERA P., H. 1997b. Establezca Coberturas Nobles en su Cafetal utilizando el Selector de Arvenses. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 1997b. 8 p. (Avances Técnicos CENICAFE N° 235).
- RIVERA P., H. 1998. Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 1998. 8 p. (Avances Técnicos CENICAFE N° 256).
- RIVERA P., H. 1999a. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de la ladera de la zona cafetera colombiana. Medellín (Colombia) Doctorado En aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 525 p. (Tesis Doctorado)
- RIVERA P., H. 1999b. El Manejo Integrado de Arvenses en Cafetales Aumenta los Ingresos y Evita la Erosión. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 1999b. 4 p. (Avances Técnicos CENICAFE N° 259).
- RIVERA P., H. 1999c. Control de Derrumbes y Negativos en Carreteras, mediante Tratamientos de Tipo Biológico. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 1999c. 8 p. (Avances Técnicos CENICAFE N° 264).
- RIVERA P., H.; GOMEZ A., A. 1991a. Erodabilidad de los suelos de la Zona Central Colombiana (Caldas, Quindio y Risaralda). Cenicafé (Colombia) 42(3): 67 - 88.
- RIVERA P., H.; GOMEZ A., A. 1991b. Erosividad de la Zona Cafetera Central Colombiana (Caldas, Quindio y Risaralda). Chinchiná (Colombia), Cenicafé.26p.
- RIVERA P., H.; GOMEZ A., A. 1993. Erosión Potencial de los suelos de la Zona Cafetera Central Colombiana (Caldas, Quindio y Risaralda) y su aplicabilidad en la orientación del uso, manejo y conservación. Cenicafé (Colombia): 44(4): 141 - 154.
- SAS INSTITUTE INC. 1993. CARY. Estados Unidos. SAS. Insight User-s Guide. Versión 6.2. ed. 4ª . Cary, NC (Estados Unidos), SAS Institute Inc., 492p.
- SUAREZ DE C., F. 1980. Conservación de suelos. 3a edición. San José de Costa Rica IICA. 315 p.
- SUAREZ DE C., F.; RODRIGUEZ G., A. 1962. Investigaciones sobre la erosión y la Conservación de los Suelos en Colombia. Bogotá (Colombia), Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 473 p..
- TRUMAN C.C. AND BRADFORD J.M. 1995. Laboratory Determination of Interril Soil erodibility. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:519-526.
- VANESLANDE A.; LAL, R.; GABRIELS D. 1987. The erodibility of some Nigerian soils: A Comparison of Rainfall Simulator Results with Estimates obtained from the Wischmeier Nomogram. Ibadam Nigeria. Hydrological Processes. Vol. 1, 255-265.
- WALKLEY A.; BLACK I.A. 1934. An examination of the Degtareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acidtitration method. Soil Sci. 37 : 29-38
- WATSON D.A.;LAFLEN J.M. 1986. Soil Strength, Slope ,and Rainfall Intensity Effects on Interril Erosión. Transactions of the ASAE.29(1):98-102.
- WISCHMEIER W. H.; SMITH D. D. 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rock mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation. United states. Department of Agriculture. Agricultural Handbook N° 282. 47 pp.
- WISCHMEIER W. H.; SMITH D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning United States Department of Agriculture. Agricultural Handbook, No 282.
- YOUNG R. A.; WIERSMA J.L. 1973. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. Water Resources Research. 9(6):1629-1636.
- YOUNG R. A.; ONSTAD C.A.; MCCOOL D.K. BENOIT G.R. 1985. Temporal Changes in soil Erodibility. U.S. Department of Agriculture. 16p.