

**PARTE A**

**Investigación Básica**

## CAPÍTULO 1

# Evaluación de Diferentes Distribuciones de Probabilidad para Ajustar la Curva de Intensidad-Frecuencia-Duración de las Lluvias a la Sabana de Bogotá, en Colombia<sup>1</sup>

*Carlos A. González M., Pedro Nel Pacheco D. y Harold Tafur H.\**

### Resumen

En la Sabana de Bogotá, en Colombia, se llevó a cabo un estudio en 13 estaciones pluviográficas localizadas entre los 2500 y los 3000 msnm que tenían una longitud de registro de 21 años (1970-1990). Seis funciones de densidad de probabilidad (fdp) fueron ajustadas regionalmente a las precipitaciones máximas ocurridas en duraciones de tiempo de 6, 12, 18 y 24 horas y se seleccionó la de mejor ajuste partiendo de las pruebas de bondad de Kolmogorov-Smirnov y del error cuadrático medio; la elección, para la región dada, recayó en la distribución Gumbel.

Las curvas de intensidad-frecuencia-duración (IFD) para las precipitaciones del estudio (duraciones de 6, 12, 18 y 24 horas) en la región dada se dibujaron al final del estudio. Adicionalmente, se desarrolló un modelo que relaciona la precipitación de 24 horas y el período de retorno de 1.25 años con precipitaciones de menor duración y con diferentes períodos de retorno.

1. Este trabajo fue financiado por el Comité de Investigación y Desarrollo Científico (CINDEC), Universidad Nacional de Colombia, Proyecto 808018.

\* Profesores asociados, Universidad Nacional de Colombia (Facultad de Ingeniería-Bogotá, Facultad de Ciencias-Bogotá, Facultad de Ciencias Agropecuarias-Palmira, respectivamente).

### Introducción

La planeación del uso de los recursos hídricos, cada vez más necesaria en nuestro medio, se puede hacer a un nivel óptimo si hay muy buenos conocimientos del carácter de las lluvias en la región estudiada. La interpretación correcta de los eventos asociados con las lluvias permite, tanto a los ingenieros como a los planificadores, obtener resultados acertados en la mayoría de las predicciones que hagan sobre esos eventos. Es necesario, por tanto, hacer estimaciones de los parámetros de cada modelo y escoger entre los modelos el que mejor se ajuste a las observaciones, de manera que las predicciones que se hagan respondan a las expectativas contenidas en un buen pronóstico.

Uno de los problemas que limitan el análisis es la falta de información detallada. Se encuentra, en efecto, información proveniente de pluviómetros, pero no son comunes las estaciones equipadas con medidores continuos de precipitación, o sea, con pluviógrafos. Es indispensable, además, construir un modelo que relacione la precipitación ocurrida en una duración de 24 horas, medida en un pluviógrafo, con las precipitaciones de menor duración y de período de retorno fijo. El modelo servirá también de herramienta para extrapolar la

información obtenida en sitios en que únicamente se dispone de pluviómetros.

## Región Estudiada y Fuentes de Información

La región bajo estudio está localizada en la Cordillera Oriental, en las montañas de los Andes. Su altitud varía de 2500 a 3900 msnm. Se sitúa en la región central de Colombia entre 4° 17' y 5° 18' de latitud norte y entre 73° 31' y 74° 25' de longitud este.

La información para este estudio fue proporcionada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (E.A.A.B.), por el antiguo Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT) y por la Corporación Autónoma Regional (CAR) de las cuencas de los ríos Bogotá, Ubaté y Suárez.

Para seleccionar las estaciones meteorológicas, se consideraban la clase de instrumentos de registro de la precipitación que poseía, su altura sobre el nivel del mar y un número de años de registro no menor de 21. Se seleccionaron así 13 estaciones pluviográficas que presentaban mediciones continuas y tenían de 2500 a 3000 msnm de altitud, aproximadamente.

## Análisis Preliminar

Se empleó la técnica de *curvas de doble masa* para verificar la congruencia de los datos de cada una de las estaciones de registro de lluvias. Esta técnica se basa en la graficación de la precipitación media acumulada en varias estaciones vecinas a la estación analizada, de un lado, frente a las mediciones acumuladas en esta última estación, del otro. Si la gráfica arroja una línea muy quebrada, ésta indica que en los puntos de ruptura la

información no es coherente (Raudkivi, 1979; Searcy y Hardison, 1985). La comparación indicó que las series de datos obtenidas en todas las estaciones seleccionadas eran *congruentes*.

La *aleatoriedad* de las series de datos, la cual permite hacer uso válido de los procedimientos de inferencia estadística, se comprobó aplicando la *prueba de rachas* reportada en Flood Studies Report (1975)<sup>2</sup>. El supuesto de aleatoriedad no se prueba contundentemente, puesto que la prueba empleada conduce a decisiones definitivas en la comprobación de resultados sistemáticos en la serie. La secuencia de rachas bajo aleatoriedad se distribuye en forma aproximadamente normal, siendo su media  $2(N-2)/3$  y su varianza  $(16N-29)/90$  (Yule y Kendall, 1950). Se empleó un nivel de significancia de 0.05.

## Análisis Regional

Se denomina análisis regional a una metodología que se emplea en estudios hidrológicos para caracterizar el comportamiento de una zona geográficamente definida que ofrece información en diversos puntos. Los métodos de regionalización de la

2. En una prueba de 'rachas' (= periodos breves de una actividad en un sentido o en otro, como las ráfagas de aire en marinería) se toma una serie cronológica de observaciones consecutivas (p. ej., precipitaciones); cada observación se rotula con un cero, p. ej., si es menor que la precedente, o con un uno, si es mayor que ésta. Un resultado hipotético sería 0000101010100001111, donde aparecen 10 rachas (= cambios de sentido): una racha larga de cuatro observaciones 'menores' (que una anterior), una racha corta de una observación 'mayor' que la anterior, una racha corta (cero) menor que la anterior, otra racha larga (uno) mayor que la anterior, etc. En el supuesto de que la serie es aleatoria, el número esperado de rachas será alto y se dejará teorizar probabilísticamente para manejar la hipótesis de aleatoriedad.

información permiten dar mayor solidez a la estimación de los parámetros de los modelos que se consideren. Los pronósticos, además, se benefician porque el error estándar será menor en los estimadores (Kite, 1977; Kuczera, 1982).

Para emplear esta metodología, los datos de cada estación se consideran provenientes de una población común en todo, excepto en que la estación tiene connotaciones particulares de media. Esto último se corrige haciendo que todas las series sean relativas a su correspondiente media, procedimiento que aquí se denomina estandarización.

### Estimación de Parámetros en Funciones de Densidad de Probabilidad (fdp)

En el Cuadro 1 se muestran las fdp que se emplean en este estudio. Para estimar los parámetros de cada una de estas fdp, se emplearon dos métodos:

el de momentos simples (MS) y el de momentos ponderados por probabilidad (MPP) que se muestran en la Figura 1 (Wallis, 1980).

El método MPP es aplicable a distribuciones que pueden expresarse en forma inversa ( $X = X(F)$ ), donde F es la función de distribución acumulada. Este método, introducido por Greenwood et al. (1979), obtiene estimadores sencillos y no sesgados (Cunnane, 1986). El MPP se define en la Ecuación 1 (p. 34), donde l, j, k son números reales y  $F = F(x) = P(X \leq x)$ . Esta definición es una expresión de mayor generalidad que la correspondiente a la definición de momentos simples. Si  $j = k = 0$ ,  $M_{l,0,0}$  representa el momento con respecto al origen, de orden l.

De las distribuciones que aparecen en el Cuadro 1, Gumbel ( $\mu, \alpha$ ), GVE ( $\mu, \alpha, \kappa$ ) y Weibull ( $\mu, \alpha, \kappa$ ) pueden expresarse en forma inversa; por tanto, a ellas se les aplicó el MPP para la estimación de sus parámetros.

Cuadro 1. Funciones de densidad de probabilidad (fdp).

Nombre de la función	Expresión para la fdp
Distribución general de valores extremos (GVE)	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[ \left( 1 - \left\{ \frac{(x-\mu)}{\alpha} \right\}^{\kappa} \right)^{1/\kappa-1} \exp - \left( 1 - \left\{ \frac{(x-\mu)}{\alpha} \right\}^{\kappa} \right)^{1/\kappa-1} \right]$
Distribución Gumbel (EV1)	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[ \exp \left\{ \left\{ \frac{-(x-\mu)}{\alpha} \right\} \right\} - \exp \left\{ \frac{-(x-\mu)}{\alpha} \right\} \right]$
Distribución Weibull de tres parámetros ( $\mu \neq 0$ )	$f(x) = \left( \exp \left\{ \frac{-(x-\mu)}{\alpha} \right\} \right)^{\kappa} \frac{\kappa}{\alpha} \left\{ \frac{(x-\mu)}{\alpha} \right\}^{\kappa-1}$
Distribución Weibull de dos parámetros ( $\mu = 0$ )	$f(x) = \frac{\kappa}{\alpha} \left\{ \frac{(x)}{\alpha} \right\}^{\kappa-1} \exp \left\{ \frac{-(x)}{\alpha} \right\}^{\kappa}$
Distribución Pearson tipo 3 (PT3)	$f(x) = \left( \exp \left\{ \frac{-(x-\mu)}{\alpha} \right\} \right) \left\{ [x-\mu]^{\kappa-1} \right\} / \left( \alpha^{\kappa} \Gamma(\kappa) \right)$
Distribución Gamma	$f(x) = \left( [x]^{\kappa-1} \exp \left\{ \frac{-(x)}{\alpha} \right\} \right) / \left( \alpha^{\kappa} \Gamma(\kappa) \right)$

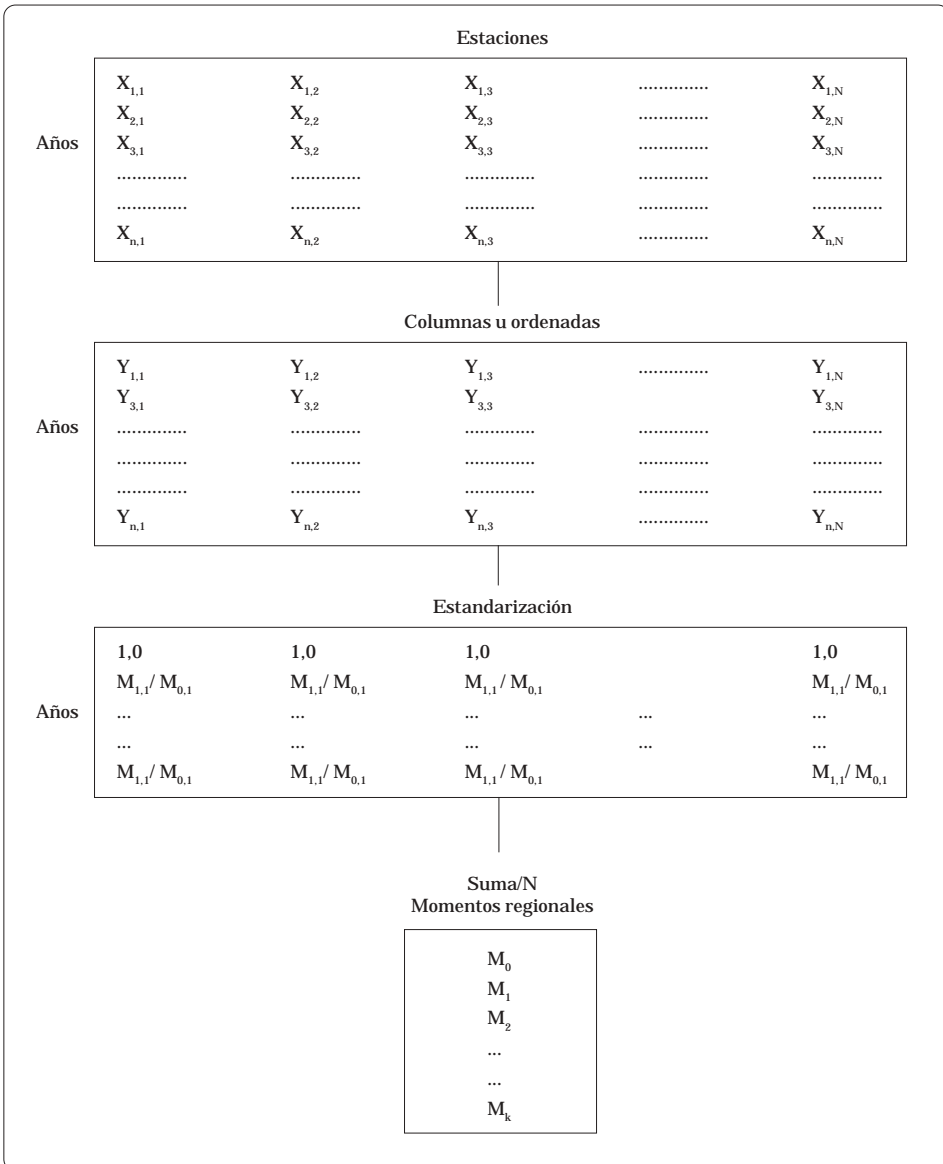


Figura 1. Algoritmo del método de estimación del momento ponderado por probabilidad (MPP) regional.

### Estimación de Parámetros por el Método MPP

Se describe primero el método de estimación MPP aplicado a la distribución general de valores extremos (GVE) que desarrollaron

Hosking et al. (1985); enseguida se presentan los algoritmos correspondientes al mismo método para la estimación de las distribuciones Gumbel y Weibull, los cuales fueron desarrollados por Greenwood et al. (1979).

### **Distribución general de valores extremos (GVE)**

Los MPP usados fueron  $M_{1,j,0}$ , que están dados en la Ecuación 2 (p. 34), donde  $\mu$ ,  $\alpha$  y  $\kappa$  son los parámetros de localización, escala y forma, respectivamente, y  $\Gamma$  denota la función matemática 'gamma'.

Para la estimación de los parámetros de la GVE se requieren solamente los cálculos de  $M_{1,0,0}$ ,  $M_{1,1,0}$  y  $M_{1,2,0}$ . El estimador de  $M_{1,j,0}$  se calcula empleando las estadísticas de orden de la muestra, ponderadas por la probabilidad empírica que les corresponde, según las Ecuaciones 3 y 4 (p. 34). En éstas,  $i$  es el rango,  $N$  el tamaño de la muestra,  $p_i$  la probabilidad empírica que sirve de estimación de  $F(x)$  para la  $i$ -ésima observación de la muestra aleatoria ordenada ascendentemente:

$$X_1 \leq X_2 \leq X_3 \leq X_4 \leq \dots \leq X_N$$

Los cálculos de las estimaciones respectivas se presentan en las Ecuaciones 5 a 8 (p. 34).

Los detalles del desarrollo algebraico de esas estimaciones pueden consultarse en Hosking et al. (1985).

El mismo procedimiento se sigue cuando esta distribución se ajusta a la región, en cuyo caso los MPP se obtienen del conjunto total de observaciones hechas en las estaciones consideradas (Figura 1).

### **Distribución Gumbel (EV1)**

Para estimar los parámetros de la distribución EV1, Greenwood et al. (1979) utilizaron la expresión  $M_{1,0,\kappa}$  con sus correspondientes estimadores, como indica la Ecuación 9 (p. 34), donde  $p_i$  es el mismo estimador usado en la distribución GVE (ver Ecuación 4).

Los parámetros se estiman empleando las Ecuaciones 10 y 11

p. 34), donde  $\mu$  y  $\alpha$  son los parámetros de localización y escala, respectivamente.

### **Distribución Weibull**

Esta distribución define sus parámetros según el valor de su cota inferior  $\mu$ ; si  $\mu = 0$ , entonces los MPP que deben emplearse son  $M_{1,0,0}$  y  $M_{1,0,1}$ . Una vez estimados estos momentos, se puede hacer la estimación de los parámetros mediante las Ecuaciones 12 y 13 (p. 34).

Cuando  $\mu$  es diferente de cero, entonces los MPP que se emplearán son  $M_{1,0,0}$ ,  $M_{1,0,1}$  y  $M_{1,0,2}$ . La estimación de los parámetros se hace entonces usando las Ecuaciones 14, 15 y 16 (p. 34).

El procedimiento para calcular los MPP para una muestra de tamaño  $N$  es similar al que se emplea para estimar los parámetros de la distribución EV1.

## **Ajuste de Distribuciones mediante Momentos Simples**

Las distribuciones Gamma y Pearson tipo III no pueden expresarse en forma invertida, o sea,  $X = X(F)$ , lo que impide la utilización del método MPP. Se emplea entonces, para estimar los parámetros de esas distribuciones, el método convencional de MS sobre la información referida a la región ('regionalizada').

### **Distribución Pearson tipo III (PT3)**

Esta distribución se caracteriza por tres parámetros (ver Cuadro 1) que representan medidas de localización ( $\mu$ ), escala ( $\alpha$ ) y forma ( $\kappa$ ). Puede adoptar variadas formas, desde la extremadamente asimétrica 'J invertida' hasta la corriente o

**Ecuaciones 1 a 16**

$$M_{1,j,\kappa} = E[X^j F^j (1-F)^\kappa] = \int_0^1 X(F)^j F^j (1-F)^\kappa dF \quad (1)$$

$$M_{1,j,0} = (j+1)^{-1} \left\{ \mu + \alpha \left[ 1 - (j+1)^{-\kappa} \Gamma(\kappa+1) \right] / \kappa \right\} \quad (2)$$

$$\hat{M}_{1,j,0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i^j X_i \quad (3) \quad p_i = \frac{i-0.35}{N} \quad (4) \quad \hat{\kappa} = 7.859c + 2.9554c^2 \quad (5)$$

$$c = \frac{2\hat{M}_{1,1,0} - \hat{M}_{1,0,0}}{3\hat{M}_{1,2,0} - \hat{M}_{1,0,0}} - \frac{\log 2.0}{\log 3.0} \quad (6) \quad \hat{\alpha} = \frac{\{2\hat{M}_{1,1,0} - \hat{M}_{1,0,0}\} \hat{\kappa}}{\Gamma(1 + \hat{\kappa})(1 - 2^{-\hat{\kappa}})} \quad (7)$$

$$\hat{\mu} = \hat{M}_{1,0,0} + \hat{\alpha} \{ \Gamma(1 + \hat{\kappa}) - 1 \} / \hat{\kappa} \quad (8) \quad \hat{M}_{1,0,\kappa} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - p_i)^\kappa X_i \quad (9)$$

$$\hat{\mu} = \hat{M}_{1,0,0} - 0.5772\hat{\alpha} \quad (10) \quad \hat{\alpha} = \frac{\hat{M}_{1,0,0} - 2\hat{M}_{1,0,1}}{\ln 2.0} \quad (11)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{M}_{1,0,0}}{\Gamma \left[ \ln \left( \hat{M}_{1,0,0} / \hat{M}_{1,0,1} \right) \ln 2.0 \right]} \quad (12) \quad \hat{\kappa} = \frac{\ln 2.0}{\ln \left( \hat{M}_{1,0,0} / 2\hat{M}_{1,0,1} \right)} \quad (13)$$

$$\hat{\mu} = \frac{4 \left\{ \hat{M}_{1,0,3} \hat{M}_{1,0,0} - \left( \hat{M}_{1,0,1} \right)^2 \right\}}{4\hat{M}_{1,0,3} + \hat{M}_{1,0,0} - 4\hat{M}_{1,0,1}} \quad (14)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{M}_{1,0,0} - \mu}{\Gamma \left\{ \ln \frac{\hat{M}_{1,0,0} - 2\hat{M}_{1,0,1}}{2(\hat{M}_{1,0,1} - 2\hat{M}_{1,0,3})} \right\} / \ln 2.0} \quad (15)$$

$$\hat{\kappa} = \frac{\ln 2.0}{\ln \left\{ \frac{\hat{M}_{1,0,0} - 2\hat{M}_{1,0,1}}{2(\hat{M}_{1,0,1} - 2\hat{M}_{1,0,3})} \right\}} \quad (16)$$

### Ecuaciones 17 a 27

$$\hat{\mu} = \bar{x} - \hat{\alpha} \hat{\kappa} \quad (17)$$

$$\hat{\alpha}^2 = s^2 / \hat{\kappa} \quad (18)$$

$$\hat{\kappa} = 2 / C_s \quad (19)$$

$$\hat{\alpha} = s^2 / \bar{x} \quad (20)$$

$$\hat{\kappa} = (s / \hat{\alpha})^2 \quad (21)$$

$$\frac{P_t^D}{P_{1.25}^D} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \ln t \quad (22)$$

$$\frac{P_t^D}{P_t^{24}} = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 \ln D \quad (23)$$

$$P_t^D = \{\hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 \ln D\} \{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \ln t\} P_{1.25}^{24} \quad (24)$$

$$\frac{P_t^D}{P_{1.25}^D} = 0.958835 + 0.375663 * \ln t \quad (25)$$

$$\frac{P_t^D}{P_t^{24}} = 1.073405 + 0.02508 * \ln D \quad (26)$$

$$P_t^D = (0.958835 + 0.375663 * \ln t) (1.073405 + 0.02508 * \ln D) P_{1.25}^{24} \quad (27)$$



normal, lo que depende del valor de su tercer parámetro. La estimación de los parámetros de esta distribución se hace partiendo de las Ecuaciones 17, 18 y 19 (p. 35).

La derivación detallada de estos estimadores puede consultarse en Kite (1977).  $C_s$  es el coeficiente de asimetría de los datos de las muestras.

### **Distribución Gamma**

Esta distribución es un caso particular de la distribución PT3, donde  $\mu = 0$ ; sus parámetros se estiman con las Ecuaciones 20 y 21 (p. 35), donde  $s$  es la desviación estándar y  $\bar{x}$  es la media.

## **La fdp Regional Escogida y sus Relaciones con la Curva IFD**

Para seleccionar la fdp que mejor se ajustara a la región, se hicieron las pruebas de bondad del ajuste de Kolmogorov-Smirnov. Varias de estas funciones resultaron apropiadas según este primer criterio; se pasó entonces a valorar el error cuadrático medio del ajuste anterior para dilucidar así la mejor fdp.

De cada registro se calculan los niveles de probabilidad de las intensidades (de lluvia) y de las duraciones especificadas; al graficar estos niveles, se obtienen las curvas de IFD.

## **Relaciones Regionales**

Bell (1969) propuso una relación empírica para las curvas de IFD. Considerando esa propuesta, en este estudio se probaron tres modelos de regresión lineal, uno para cada una de las relaciones que se indican a continuación. El análisis de varianza de los ajustes realizados indicó que las Ecuaciones 22 y 23 (p. 35) tenían el mejor comportamiento.

Desarrollando la Ecuación 22 para 24 horas de duración y sustituyendo el resultado en la Ecuación 23, se obtiene un *modelo general* que se expresa en la Ecuación 24 (p. 35).

## **Resultados**

Se seleccionaron 13 estaciones pluviográficas en las cuales las curvas de doble masa dieron evidencia de que la información disponible era

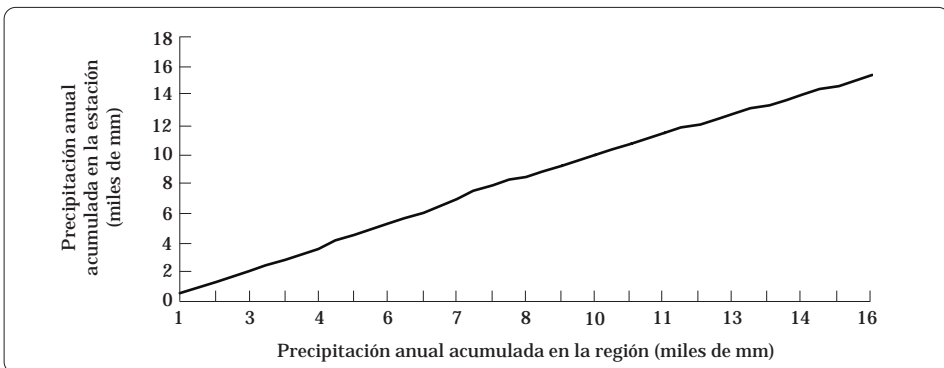


Figura 2. Curva de doble masa para comprobar la coherencia de los datos de precipitación de la estación Guaymaral, en la Sabana de Bogotá.

Cuadro 2. Parámetros regionales estimados para precipitación máxima en duraciones de 6, 12, 18 ó 24 horas, según las distribuciones de probabilidad estudiadas.

Funciones fdp	Duración de 6 horas			Duración de 12 horas			Duración de 18 horas			Duración de 24 horas		
	$\mu$	$\alpha$	$\kappa$	$\mu$	$\alpha$	$\kappa$	$\mu$	$\alpha$	$\kappa$	$\mu$	$\alpha$	$\kappa$
GEV	0.862	0.267	0.065	0.872	0.264	0.101	0.876	0.248	0.086	0.882	0.251	0.122
EV1	0.854	0.252		0.860	0.242		0.867	0.230		0.869	0.227	
Weibull ( $\mu \neq 0$ )	0.403	0.337	2.000	0.387	0.320	2.167	0.430	0.305	2.109	0.400	0.297	2.285
Weibull ( $\mu = 0$ )		1.110	3.603		1.107	3.770		1.103	3.985		1.103	4.046
Pearson tipo III (PT3)	0.322	4.965	0.136	0.086	10.187	0.090	0.149	9.756	0.087	-0.075	16.422	0.065
Gamma		10.818	0.092		12.200	0.081		13.461	0.074		14.215	0.070

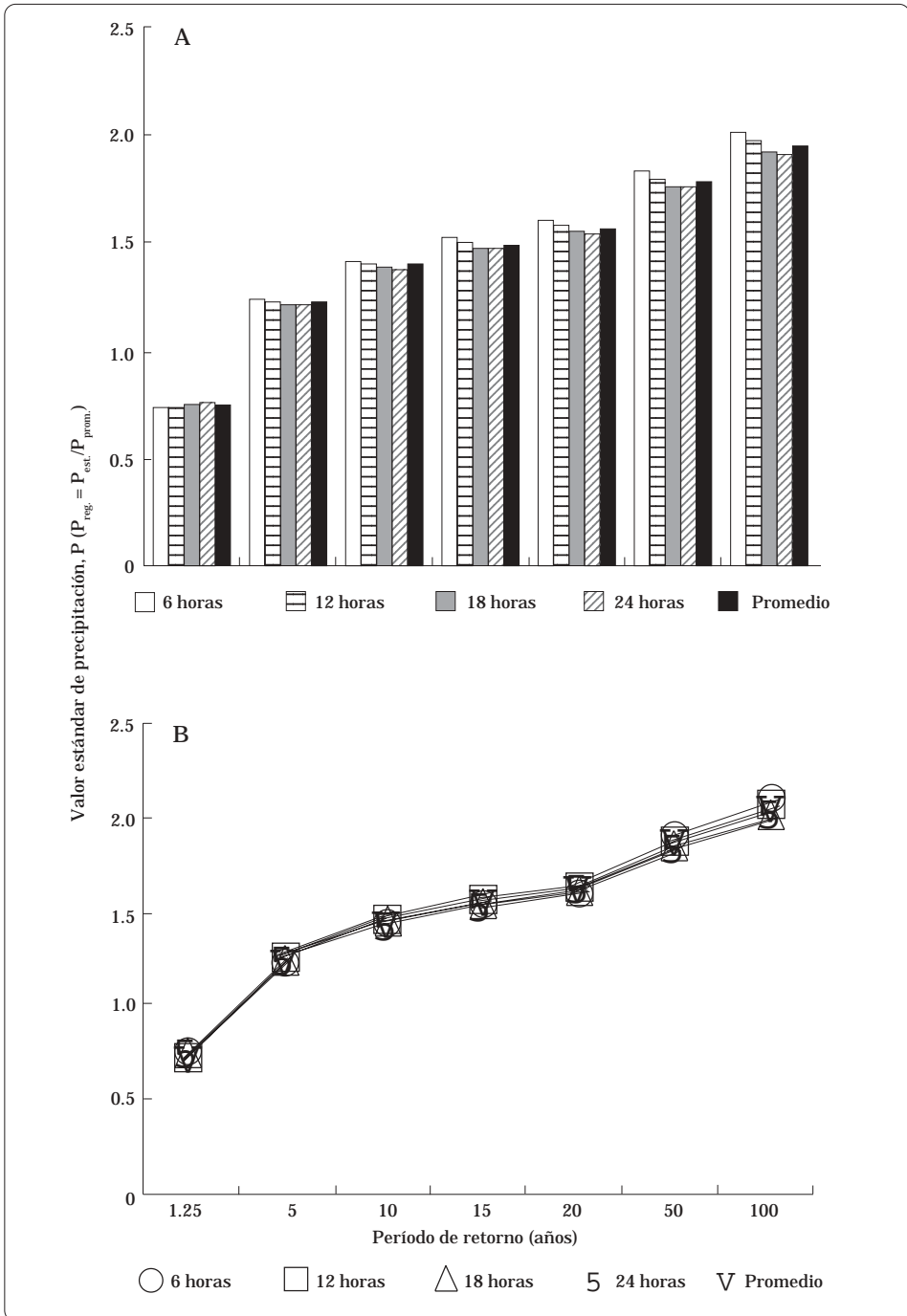


Figura 3. Distribución regional Gumbel (EV1). (reg. = región; est. = estación pluviográfica; prom. = promedio). A = histograma; B = curva.

coherente. La precipitación anual registrada en la estación Guayamaral (Figura 2) refleja el comportamiento típico de las demás series de datos seleccionadas.

### **Otras pruebas**

Las pruebas de rachas para establecer la aleatoriedad de las series de datos de precipitación condujeron a la aceptación (no se rechaza) de la hipótesis nula, es decir, hay aleatoriedad en los datos. Los parámetros regionales estimados para las diferentes fdp aparecen en el Cuadro 2.

Las pruebas de bondad del ajuste indicaron que la fdp que mejor se comportó, en todas las pruebas, fue la Gumbel (EV1).

Las curvas de IFD se muestran en la Figura 3. Se observa allí que todas tienden a confundirse en una sola, lo cual facilitará su manejo cuando se apliquen en la región. Para usarlas, es necesario conocer el valor promedio de la precipitación para una duración dada o una ecuación que relacione la precipitación en 24 horas de duración con las lluvias que ocurran en una duración menor.

### **Modelo regional**

Se hizo un análisis de regresión entre diferentes modelos, con lluvias ocurridas en duraciones de 24 horas en períodos de retorno variables, de una parte, y lluvias ocurridas en duraciones dadas y con períodos de retorno también dados. Los resultados de este análisis condujeron a los modelos expresados en las Ecuaciones 25, 26 y 27 (p. 35).

Estas ecuaciones han sido elaboradas con datos de muy pocas estaciones. No obstante, podrán usarse para predecir la precipitación tanto en las cuencas de la región que no posean

estaciones pluviográficas como también en las que sí las tengan; en éstas últimas se conoce el valor promedio de la precipitación en cada estación. Estos usos potenciales se apoyan en los diferentes estudios regionales que han comprobado la solidez de los métodos regionales (González, 1989).

## **Referencias**

- Bell, F. C. 1969. Generalized rainfall-duration frequency relationships. Proc. ASCE, vol. 95, HY1, p. 311-327.
- Cortés, L. A. 1976. Aptitud de uso de los suelos de la Sabana de Bogotá y de sus alrededores. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Santafé de Bogotá.
- Cunnane, C. 1978. Unbiased plotting positions: A review. J. Hydrol. 37:205-222.
- Cunnane, C. 1986. Stochastic hydrology. Curso de Maestría, secciones A y B. University College, Galway, Irlanda.
- Daniel, W. 1989. Bioestadística. 3a. ed. Trad. de Biostatistics, Georgia State University. Ed. Limusa, México. p. 525-533.
- Flood Studies Report. 1975. Hydrological 1; Meteorological Studies 2; Flood routing studies 3; Hydrological data 4; y Maps 5. Natural Environment Research Council, Londres.
- González, C. 1989. Métodos regionales de análisis de frecuencia. Revista Ingeniería e Investigación (Universidad Nacional de Colombia) 5(3):28-38.
- Greenwood, J. A.; Landwehr, J. M.; Matalas, N. C.; y Wallis, J. R. 1979. Probability weighted moments: Definitions and their relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. Water Resour. Res. 15(5):1049-1054.

- Hosking, J. R. M.; Wallis, J. R.; y Wood, E. F. 1985. Estimation of the generalised extreme value distribution by the method of probability weighted moments. *Tecnometrics* 27(3):251-261.
- Kite, G. W. 1977. Frequency and risk analysis in hydrology. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado.
- Kuczera, G. 1982. Robust flood frequency models. *Water Resour. Res.* 18(2):315-324.
- Montealegre, B. J. E. 1990. Técnicas estadísticas aplicadas al manejo de datos hidrológicos y meteorológicos. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT), Santafé de Bogotá. p. 31-42.
- Pacheco P. N.; González, C.; y Tafur, H. 1992. El método P.W.M. frente a los métodos clásicos de estimación de parámetros de la distribución Gumbel. Curso Internacional de Drenaje de Tierras Agrícolas, Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
- Raudkivi, A. J. 1979. Hydrology: An advanced introduction to hydrological processes and modelling. Pergamon Press, Londres. p. 465.
- Searcy, J. K. y Hardison, C. H. 1985. Curvas de doble masa. Trad. del inglés por Barrero, A. P. y Sabogal, N. A. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT), Santafé de Bogotá.
- Wallis, J. R. 1980. Risk and uncertainties in the evaluation of flood events for the design of hydrological structures. Nota presentada en el Seminar on Extreme Hydrological Events: Floods and Droughts celebrado en Erice, Italia. 33 p.
- Yule, G. U. y Kendall, M. G. 1950. An introduction to the theory of statistics. Hafner Publishing Co., Nueva York.

## CAPÍTULO 2

# Cuantificación y Estudio de la Erodabilidad de los Suelos Andinos en el Suroccidente Colombiano

*D. E. Leihner\* , M. Ruppenthal\*, J. A. Castillo F.\*\* y K. Müller-Sämann\**

### Resumen

La Universidad de Hohenheim está manejando en colaboración con el CIAT, desde 1986, un proyecto de investigación sobre la erosión y la conservación de los suelos andinos en el suroccidente colombiano. El proyecto está orientado, principalmente, a los Inceptisoles prevalentes en el departamento del Cauca. Para la generación y el procesamiento de los datos se utilizó el modelo para estimación de la pérdida de suelo (USLE, en inglés), desarrollado por Wischmeier y Smith (1978). El trabajo de campo se llevó a cabo en la estación experimental del CIAT en Santander de Quilichao y en la finca de un pequeño agricultor de Caldon, Cauca.

Se halló que la resistencia inherente de los Inceptisoles andinos del suroccidente de Colombia a la erosión era alta, ya que los valores de K eran hasta 10 veces más bajos que los observados en los suelos agrícolas susceptibles de otras partes del mundo.

La influencia de la erodabilidad en los procesos erosivos es relativamente

baja si la comparamos con factores como la erosividad de las lluvias y el manejo agronómico; el parámetro de mayor impacto es, en este caso, el factor C (manejo agronómico).

Después de tener, cubiertos por pastos, un descanso prolongado, los Inceptisoles andinos son muy estables; pierden, sin embargo, esta cualidad a partir del tercer año de cultivo permanente. La erodabilidad es, por tanto, un factor dinámico, y es posible influenciarla mediante prácticas culturales apropiadas, tales como la rotación de algún cultivo con una mezcla de pasto y leguminosa.

Comparada con el método empírico, la determinación del factor K por el nomograma subestima los valores reales hallados hasta por un factor de 6. La posible causa de esta diferencia es el alto grado de agregación que causa un comportamiento de tipo arenoso en los suelos arcillosos. Además, el contenido de materia orgánica (M.O.) de los suelos investigados es más alto de lo que permite considerar el nomograma; esta M.O., además, es poco activa.

### Introducción

La Universidad de Hohenheim maneja en colaboración con el CIAT, desde 1986, un proyecto de investigación sobre la erosión y la conservación de los

\* Investigadores, Universidad de Hohenheim, Stuttgart, Alemania.

\*\* I.A., M.Sc., Asistente de investigación, Proyecto de Conservación de Suelos y Aguas, CIAT, Cali, Colombia.

suelos andinos en el suroccidente colombiano; el proyecto está orientado, principalmente, hacia los Inceptisoles que predominan en el departamento del Cauca.

Las investigaciones se llevaron a cabo partiendo del modelo para estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica, desarrollado por Wischmeier y Smith (1978), o sea, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, EUPS (en inglés: Universal Soil Loss Equation, USLE).

Este trabajo presenta algunos resultados de la investigación sobre uno de los seis parámetros considerados por la EUPS, el factor K, con el cual se caracteriza la erodabilidad de los suelos.

## Materiales y Métodos

La investigación de campo se llevó a cabo en parcelas de escorrentía en la estación experimental del CIAT en Santander de Quilichao (CIAT-Quilichao) y en la finca de un pequeño agricultor en el corregimiento de Mondomo, en Caldon, Cauca.

Santander de Quilichao está situado a 3° 06' N y 76° 31' W. El clima es subhúmedo y tiene 1799 mm de precipitación anual y una temperatura media anual de 23.8 °C. El suelo fue clasificado como Oxic dystropept (Inceptisol), que tiene pH y CIC bajos. El relieve de Quilichao se caracterizó por las pendientes leves (de 7% a 13%).

Mondomo está situado a 2° 53' N y 76° 35' W. El clima también es subhúmedo, con 2133 mm de precipitación anual y una temperatura media anual de 18.2 °C. El suelo es un Oxic humitropept (Inceptisol) con características similares a las de Santander de Quilichao, aunque ha recibido mayor influencia de las cenizas volcánicas. El relieve de Mondomo es un poco más accidentado

que el de Santander de Quilichao, con pendientes que van de 12% a 20%.

La erodabilidad o factor K de la EUPS (objeto de este estudio) se define como la *susceptibilidad inherente de un suelo específico a la erosión por el agua*. Puede determinarse tanto en forma indirecta como directamente. El procedimiento para la determinación directa (que es empírica) fue descrito por Wischmeier y Smith (1978), quienes midieron la cantidad de suelo perdido en parcelas de escorrentía y calcularon una tasa de pérdida de suelo, o sea, el suelo perdido por unidad del factor R (erosividad de la lluvia). Hicieron un gran número de determinaciones directas y desarrollaron, finalmente, el método de estimación indirecta, por nomograma, de la erodabilidad. En este nomograma, el factor K se estima en función de las propiedades físicas y químicas del suelo, tales como textura, materia orgánica (M.O.), estructura y permeabilidad.

## Resultados

Los resultados aquí indicados destacan, ante todo, la importancia de la erodabilidad (K) en los procesos de erosión relacionándola con otros factores que influyen en ésta, tales como la erosividad de la lluvia (R) y el manejo agronómico del suelo (C); es útil, por ello, comparar los cambios que se observaron en la erodabilidad del suelo, en la erosividad del clima y en la cobertura del suelo por los cultivos.

- En la época de cultivo de 1990-1991, en Santander de Quilichao, la parcela que gozaba de las mejores condiciones de suelo tuvo una erodabilidad K de 0.015, mientras que la que se hallaba en peor estado alcanzó un valor K de 0.018; el factor de variación es, por tanto, de 1.2.

- En la misma época, el mes en que la erosividad fue más baja tuvo un factor R de 100, mientras que el mes de erosividad más alta llegó a un factor R de 1400; resulta así un factor de variación de 14.
- La pérdida de suelo relativa es influida por el manejo agronómico (principalmente por la cobertura); se expresa por el factor C, que tuvo la variación más fuerte (entre 0.01 y 1.44) y dio, por ello, un factor de variación de 144 (Cuadro 1).

Estos datos indican, asimismo, el potencial que tiene cada uno de estos factores para ejercer una influencia sobre los procesos de erosión:

- El *factor K*, al menos durante un ciclo vegetativo, no está sujeto a mucha variación; por lo tanto, durante un año o un ciclo vegetativo, tiene solamente un mínimo potencial de influencia sobre los procesos de erosión de corto plazo.
- El *factor R* tiene una influencia notable sobre los procesos de erosión y sobre la cantidad de suelo perdido, pero no es susceptible a la acción del manejo.

Cuadro 1. Valor mínimo, valor máximo y factor de variación de la erodabilidad del suelo (K), de la erosividad de la lluvia (R) y del factor de manejo agronómico (C) durante la época de cultivo 1990-1991, en Santander de Quilichao, Colombia.

Valores	Factores		
	K	R	C
Valor mínimo	0.015	100	0.01
Valor máximo	0.018	1400	1.44
Factor de variación <sup>a</sup>	1.2	14	144

a. Factor por el cual hay que multiplicar el valor mínimo para llegar al valor máximo.

FUENTE: Leihner et al. (1996).

- El *factor C* es el de mayor impacto en los procesos de erosión y el que tiene más posibilidades de ser influenciado mediante un manejo agronómico apropiado.
- Los datos sobre K acumulados desde que se inició esta investigación en Santander de Quilichao y en Mondomo (Ruppenthal et al., 1996) demuestran dos hechos:
  - A *corto plazo*, la posibilidad de influenciar a K en sentido positivo (por ejemplo, agregando M.O. al suelo) o en sentido negativo (por un uso inapropiado que lleve los suelos a la degradación) es limitada.
  - A *largo plazo*, la erodabilidad es un factor dinámico que causa cambios muy claros según los procesos de degradación que se produzcan (Cuadro 2).

Los datos de K en las parcelas de escorrentía (sin cultivo) de Santander de Quilichao indican —desde el año en

Cuadro 2. Pérdida de suelo y factor K de la ecuación universal que estima las pérdidas de suelo por erosión hídrica (EUPS), en Santander de Quilichao, Colombia.<sup>a</sup>

Año de observación	K	Pérdida de suelo (t/ha)
1986-87	0.0014	15.0
1987-88	0.0040	49.2
1988-89	0.0130	196.5
1989-90	s.d. <sup>b</sup>	165.0
1990-91	0.0150	143.7
1991-92	0.0180	222.6

a. Ambos factores fueron determinados directamente partiendo de datos tomados en parcelas de escorrentía sin vegetación, durante 7 años.

b. s.d. = sin datos disponibles.

FUENTE: Ruppenthal et al. (1996).



que comenzó el proyecto (1986) y durante los primeros 2 años— un valor de K muy bajo, que corresponde a una resistencia a la erosión muy alta del suelo. La situación cambió a partir del tercer año, cuando ocurrió un aumento brusco de K y, por ello, una pérdida notable de la estabilidad del suelo. Este proceso continuó hasta el final del período observado.

El comportamiento de K en Mondomo, durante el mismo período, fue muy similar. En las condiciones climáticas y ambientales que prevalecían en Santander de Quilichao, se cultivaba un suelo que, cubierto con el pasto *Paspalum notatum*, había estado en descanso muchos años. Por esta razón, al parecer, presentó un período de gracia en que el riesgo de erosión fue bajo durante 2 años; en este tiempo, la estabilidad estructural y la resistencia a la erosión del suelo fueron considerables. Este suelo perdió sus cualidades progresivamente en los años siguientes porque los sistemas de cultivo que soportó no contribuyeron, de manera adecuada, a su

conservación. En cambio, los cultivos que rotan con mezclas de pastos y leguminosas sí han contribuido a su mejoramiento.

Los datos presentados en este trabajo se prestan también para hacer una comparación metodológica. Se comparará por ello, en adelante, la efectividad del método de determinación de K ideado por Wischmeier y Smith (método indirecto por nomograma) con los resultados obtenidos mediante determinación empírica (parcelas de escorrentía).

Durante las épocas de cultivo de 1990 a 1992, se tomaron muestras de suelo que permitieron obtener la información necesaria para los cálculos de K previstos por el nomograma. Los resultados se presentan en el Cuadro 3. Ahora bien, la comparación de los valores de K calculados mediante el nomograma, con los valores de K determinados empíricamente, muestra que los valores calculados subestiman, por un factor de 2.5 a 6, la erodabilidad determinada empíricamente (Cuadro 4).

Cuadro 3. Propiedades del suelo en una profundidad de 0 a 10 cm, en las parcelas de escorrentía establecidas en Santander de Quilichao y en Mondomo, en el departamento del Cauca, Colombia. Los datos son promedios de los muestreos hechos entre 1990 y 1992.

Parámetro	En Santander de Quilichao	En Mondomo
Textura (método de pipeta)		
arcilla, % (< 0.002 mm)	75.03	64.14
limo, % (0.002 a 0.05 mm)	15.68	21.15
arena muy fina (0.05 a 0.1 mm)	2.13	1.51
arena fina (0.1 a 0.25 mm)	5.55	6.16
resto de arena (0.25 a 0.63 mm)	1.61	7.04
Materia orgánica, % <sup>a</sup>	5.80	4.80
Código de estructura	3	3
Clase de permeabilidad	2	2

a. Para el cálculo según el nomograma; en este caso se usa el valor de 4%.

FUENTE: Ruppenthal et al. (1996).

Cuadro 4. Comparación de los valores de K estimados con el nomograma de Wischmeier y Smith (1978) con los determinados empíricamente en las parcelas de escorrentía de Santander de Quilichao y Mondomo, durante el período 1990 a 1992.

Método de determinación	Valor K	
	En Quilichao	En Mondomo
Por nomograma	0.0033	0.0056
Empírico	0.0180	0.0120

La explicación de que se subestime ese valor se halla, posiblemente, en dos aspectos:

- Por un lado, se encontraron altos valores de arcilla en los análisis de laboratorio que reflejan una situación artificial frente al estado de agregación de esas arcillas en el suelo, induciendo en ellas un comportamiento similar al de los suelos constituidos por limo y arena fina (Lal, 1990; Roose, 1975).
- Por otro lado, el procedimiento con que se calcula el valor K por el nomograma limita el rango de cálculo para la M.O. a 4.0%, cuando en realidad los suelos tienen contenidos de M.O. superiores.

## Conclusiones

- En los Inceptisoles andinos del suroccidente de Colombia se encontró una alta resistencia inherente a la erosión.
- Al comparar la influencia de la erodabilidad con la que tienen la erosividad de las lluvias y el manejo agronómico, se encontró que la primera es relativamente baja y que el parámetro de mayor impacto era el factor C (manejo agronómico).
- Después de un descanso prolongado gracias a las pasturas

que en ellos se establezcan, los Inceptisoles andinos son muy estables; sin embargo, pierden esta cualidad a partir del tercer año de cultivo permanente.

- La erodabilidad es, por tanto, un factor dinámico de largo plazo que puede ser influenciado mediante prácticas culturales apropiadas, tales como la asociación de cultivos y la rotación de cultivos con mezclas de pastos y leguminosas.
- Comparada con el método empírico, la determinación del factor K por el nomograma subestima, hasta por un factor de 6, los valores reales de K que se hallaron para los Inceptisoles andinos.
- Este efecto puede deberse tanto al alto grado de agregación —que induce, en los suelos arcillosos, un comportamiento parecido al de los suelos constituidos por limos y arenas finas— como al contenido de M.O. de los suelos investigados —más alto de lo que permite considerar el nomograma.

## Referencias

- Bouyoucos, G. J. 1929. A comparison between pipette method and the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. *Soil Sci.* 28:335-345.
- Lal, R. 1990. *Soil erosion in the tropics.* McGraw-Hill, Nueva York, N.Y. 580 p.
- Leihner, D. E.; Ruppenthal, M.; Hilger, T. H.; y Castillo, J. A. 1996. Soil conservation effectiveness and crop productivity of forage legume intercropping, contour grass barriers and contour ridging in cassava on Andean hillsides. *Exp. Agric.* 32:327-338.

- Roose, E. J. 1975. Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa. En: Greeland, D. y Lal, R. (eds.). Soil conservation and management in the humid tropics. Wiley, Chichester. p. 177-187.
- Ruppenthal, M.; Leihner, D. E.; Hilger, T. H.; y Castillo, J. A. 1996. Rainfall erosivity and erodibility on Inceptisols in the southwest Colombian Andes. *Exp. Agric.* 32:91-101.
- Wischmeier, W. H.; Johnson, C. B.; y Cross, B. V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Conserv.* 26:189-193.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agricultural Handbook no. 537. United States Department of Agriculture (USDA), Washington, D.C., E. U.

## CAPÍTULO 3

# Procesos Físicos de Erosión y su Dinámica: Prevención y Control en Suelos de Ladera de la Zona Cafetera Colombiana

*José Horacio Rivera P.\**

### Resumen

Usando un simulador de lluvia en el laboratorio y una intensidad de lluvia de 100 mm/h, se determinaron dos índices de erodabilidad:  $K_i$  o erodabilidad entre surcos, de la WEPP (Lal y Elliot, 1994; Nearing et al., 1989) y  $K$ , de la USLE (Wischmeier y Smith, 1978). Se ensayaron cinco suelos de la zona cafetera que tenían agregados de tres tamaños: 1 a 2, 0.5 a 1 y < 0.5 mm. Tres de estos suelos derivan de cenizas volcánicas (Chinchiná, Montenegro y Fresno) y son Typic melanudans; los otros dos (Parnaso y Guamal) son Typic eutropepts y derivan de basaltos y areniscas olivínicas. Las muestras fueron tomadas de los primeros 10 cm de suelo y se prepararon manualmente en bandejas que tenían un gradiente del 70%.

En los suelos de cenizas volcánicas, el flujo de agua por percolación está en un rango de 65% a 91%. En contraste, el flujo por escorrentía para el suelo de Guamal está entre 55% y 75%. La escorrentía es mayor en los agregados menores que 0.5 mm. Las mayores pérdidas de suelo ocurren por dispersión de los agregados. Los lodos

suspendidos en las aguas de escorrentía y de percolación son muy bajos en todos los suelos, excepto donde los agregados son menores que 0.5 mm.

Los valores más altos de erodabilidad están en los agregados menores que 0.5 mm. Los rangos promedio registrados (valores máximos y mínimos) de  $K_i$  (kg-s/m<sup>4</sup>) y de  $K$  (t-ha-h/MJ-mm-ha) para cada suelo son, respectivamente, 13.76 a 53.94 y 0.093 a 0.370 para el suelo de Guamal; 1.39 a 25.39 y 0.009 a 0.172 para el de Montenegro; 1.91 a 13.25 y 0.013 a 0.090 para el de Chinchiná; 2.05 a 13.50 y 0.014 a 0.080 para el de Parnaso; y 1.98 a 8.75 y 0.013 a 0.060 para el de Fresno. La erodabilidad de los suelos se incrementa cuando decrece su contenido de materia orgánica.

Se desarrolló un programa de manejo integrado de arvenses en el cultivo del café para reducir la erosión, en el cual se emplearon coberturas 'nobles', es decir, plantas de porte bajo o rastrero que protegen el suelo contra la erosión hasta niveles de 95% a 97% sin interferir con el cultivo. Un manejo selectivo permitió eliminar las arvenses agresivas para favorecer así el dominio poblacional de las coberturas nobles existentes en el terreno. Se diseñó con tal fin un equipo sencillo, económico, de poco peso y fácil de construir por el agricultor, que tiene, además, el

\* I.A., M.Sc. Investigador, Líder del Programa Conservación de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé), Chinchiná, Caldas, Colombia.

incentivo intrínseco de reducir los costos de producción (de 85% a 92% respecto a la desyerba tradicional con machete).

Se describen también algunos tratamientos biológicos de control de procesos avanzados de erosión; se emplearon en ellos materiales disponibles en la finca, como escombros de construcción, piedra, gravilla y especies de fácil propagación, ya sea vegetativa o por semilla. Se logra así recuperar suelos erosionados en un tiempo corto (de 3 meses a 3 años), con obras sencillas adaptadas al medio ambiente, y a un costo bajo (de 85% a 98% menor que el de las obras de concreto).

## Introducción

Wischmeier y Smith (1978) establecieron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, EUPLS (en inglés: Universal Soil Loss Equation, USLE) que contiene los factores activos, pasivos y atemperantes que causan la erosión. La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia ha trabajado en la determinación de los siguientes factores: *R*, el índice de erosividad de las lluvias, mediante los índices de erosión pluvial de Fournier (1975) y los de Hudson (1982); *K*, la susceptibilidad del suelo a la erosión, mediante índices de erodabilidad; *L*, la longitud de la pendiente; *S*, el grado de la pendiente; *C*, el uso del suelo en cultivos; y *P*, las prácticas de conservación de suelos.

Estos trabajos se han hecho en parcelas de escorrentía diseñadas para estudiar y evaluar el comportamiento de dichos factores o parámetros en la zona cafetera central colombiana, en suelos de ladera (Typic melanudans) sometidos a diversos sistemas de producción agrícola (café y otros cultivos). Rivera (1990) determinó, para la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda), el factor erodabilidad en

forma indirecta empleando la ecuación de Wischmeier y Smith (1978). La ecuación permite determinar el factor erodabilidad de suelos cuyo contenido máximo de materia orgánica (M.O.) sea de 12%, lo que limita su aplicación en gran cantidad de suelos de la zona cafetera colombiana que tienen cantidades de M.O. superiores.

En el presente trabajo se reportan tres datos:

- los valores de erodabilidad *K*, del Proyecto de Predicción de la Erosión Hídrica (en inglés: Water Erosion Prediction Project, WEPP), y *K*, de la EUPLS, de cinco suelos de la zona cafetera central de Colombia, empleando un simulador de lluvias bajo condiciones de laboratorio;
- el movimiento del agua en los suelos dichos; y
- los diferentes procesos que ocurren en la erosión de esos suelos.

Se desarrolló una tecnología de *manejo integrado de arvenses* para prevenir la erosión de los suelos y estimular la práctica de esa prevención con la reducción en los costos de producción que genera. Asimismo, se desarrolló una tecnología de bajo costo para el control de problemas de erosión avanzada en forma de cárcavas remontantes.

## Suelos, Lluvias y Medidas

### Suelos

Se ensayaron cinco 'unidades de suelo' ubicadas en diferentes regiones de la zona cafetera colombiana (Cuadro 1) y se empleó un simulador de lluvias en condiciones de laboratorio (Rivera et al., 1996a; 1996b). Tres de los suelos derivan de cenizas volcánicas: las unidades Chinchiná, Montenegro y

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

Localidad	Unidad de suelos	Altitud (m)	Lluvia (mm)	Días lluviosos (media)	Temp. media (°C)	Humedad relativa anual (%)
Caldas						
Supía	Guamal	1320	2254	183	21.7	75
Chinchiná	Chinchiná	1400	2665	251	20.6	78
Marquetalia	Fresno	1450	3627	216	20.8	82
Quindío						
Quimbaya	Montenegro	1450	2004	203	20.8	78
Valle						
Sevilla	Parnaso	1540	1617	188	20.3	—

Fresno, que son Typic melanudans. Las dos unidades restantes, Parnaso y Guamal, son Typic eutropepts y derivan de basalto y areniscas olivínicas, respectivamente (Federacafé, 1982; 1986). De cada una de las cinco unidades de suelos se tomaron 30 kg previamente tamizados (10 kg para cada tamaño de agregados); los 150 kg totales fueron llevados en botellas plásticas al Laboratorio de Física de Suelos de la Universidad del Estado de Ohio, Columbus, Estados Unidos.

Los suelos fueron seleccionados por sus diferencias de textura, su contenido de M.O. y su representatividad en el cultivo del café. Estos suelos estaban sembrados con cultivos perennes, como café, pastos, plátano y cítricos. Las muestras de suelo se tomaron de los primeros 10 cm de profundidad, fueron secadas a la sombra y luego tamizadas según los siguientes tamaños de agregados: de 1 a 2, 0.5 a 1 y < 0.5 mm de diámetro. Las muestras tamizadas se distribuyeron manualmente en bandejas metálicas de 20.32 cm de ancho por 40.64 cm de longitud (0.08258 m<sup>2</sup>). Se diseñaron dos repeticiones.

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

- Anjeo
- Tela de gasa
- Arena lavada (3 cm) que actúa como filtro
- Muestra de suelo (2 cm espesor) uniformemente distribuida.

Las muestras de suelo ya distribuidas en las bandejas fueron sometidas a saturación por capilaridad con agua deionizada, durante un período de 24 horas. Una vez saturadas, fueron drenadas durante 1 hora y dispuestas con una pendiente del 70%. Alrededor de la bandeja se colocó un protector metálico de 54 cm de altura, para evitar pérdidas de suelo por dispersión de los agregados a consecuencia del impacto de las lluvias.

El *simulador de lluvias* fue calibrado a una intensidad de 100 mm/h, que equivale a una energía cinética de

0.002936 J/cm<sup>2</sup>·mm de lluvia, durante 1 hora. Esta intensidad de lluvias es representativa de las que se observan en la zona cafetera colombiana.

**Mediciones**

Se determinó la distribución del flujo de agua por escorrentía y por percolación en cada una de las muestras de las diferentes unidades de suelos, a intervalos de 5 minutos durante 1 hora. Asimismo, se calcularon las pérdidas de suelo por escorrentía, percolación, dispersión de agregados y suelo depositado en el canal de escorrentía.

**Indice de erodabilidad K de la USLE.** Se aplicó la metodología propuesta por Wischmeier y Smith (1978), que parte de la USLE y se basa en la erosividad de las lluvias (R) y en la pérdida de suelo por erosión (A) medida en t/ha:

$$A = R \times K \quad (1)$$

donde:

- A = Pérdida de suelo (t/ha·año)
- R = Indice de erosividad de las lluvias, una medida de la agresividad de las lluvias que causan la erosión (MJ·mm/ha·h)·año.
- K = Indice de erodabilidad del suelo, es decir, de la susceptibilidad del suelo a la erosión (t·ha·h/MJ·mm·ha)

Por otra parte,

$$R = E \cdot I_{30} / 100 \quad (2)$$

donde:

- E = Energía cinética de la lluvia (MJ/ha·mm)
- = 210.3 + 89 log<sub>10</sub> (I<sub>30</sub>) (mm/h)

$$I_{30} = \text{Intensidad de la lluvia en un tiempo de 30 min}$$

$$= 49.2 \text{ mm/30 min}$$

$$\text{En 1 hora: } 49.2 \times 2 = 98.4 \text{ mm/h}$$

$$\cong 100 \text{ mm/h}$$

Por tanto,

$$E = 210.3 + \log_{10} (98.4) = 387.68 \text{ MJ/ha}$$

Sustituyendo, entonces, en la Ecuación 2, tenemos:

$$R = 387.68 \text{ MJ/ha} \cdot 98.4 \text{ mm/h} / 100$$

$$= 381.48 \text{ MJ} \cdot \text{mm} / \text{ha} \cdot \text{h}$$

**Indice K<sub>i</sub> del WEPP.** La erosión entre surcos, representada por el índice K<sub>i</sub> del WEPP, se deduce de la siguiente ecuación (Bajracharya et al., 1992; Lal y Elliot, 1994):

$$D_i = K_i \cdot I \cdot S_f \quad (3)$$

donde:

- D<sub>i</sub> = Pérdidas de suelo entre surcos (kg/m<sup>2</sup>·s)
- K<sub>i</sub> = Erodabilidad entre surcos (kg/s·m<sup>4</sup>)
- I = Intensidad de la lluvia (m/s) = 1 m/3600 s = 0.00028 m/s
- S<sub>f</sub> = Factor pendiente: 1.05 - 0.85 ln [-4 sen (θ)]
- θ = Angulo de la pendiente en grados = 35°

La pendiente de la bandeja, en porcentaje, era de 70% = 70/100 (una tangente) = 0.7; por tanto, tang<sup>-1</sup>(0.7) = 35°. Esta pendiente es la más representativa de los suelos de la zona cafetera de Colombia. Por consiguiente, el factor pendiente será:

$$S_f = 1.05 - [0.85 \ln (-4 \text{ sen } 35^\circ)]$$

$$= 0.96429 \quad (4)$$

Con estos datos se puede determinar  $K_f$ .

**Otros factores.** Se determinaron factores físicos y químicos de los suelos que permiten, mediante correlaciones, observar la influencia que cada uno de ellos tiene en el factor erodabilidad de los suelos ( $K$  en la USLE, y  $K_f$  en la WEPP). Son los siguientes:

- Contenido de M.O., en porcentaje.
- Granulometría.
- Humedad del suelo a capacidad de campo (CC).
- Punto de marchitez permanente (PMP) y agua disponible.
- pH y contenidos de K, Ca, Mg, P, Fe, Mn, Zn, Cu y Al.
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC).

### **Protección contra la erosión**

**Coberturas.** Se desarrolló un equipo sencillo y de bajo costo para aplicar herbicidas, denominado *selector de coberturas 'nobles'*. Estas coberturas, que protegen el suelo contra la erosión, forman parte de un programa de *manejo integrado de arvenses* y no afectan la producción del cultivo.

**Problemas avanzados de erosión.** Se aplicó una estrategia para controlar estos problemas, cuyos elementos metodológicos se enumeran enseguida:

- Desviación de aguas de escorrentía que penetran en la cárcava.
- Corrección de taludes para suavizarlos.
- Protección del fondo o cauce de la cárcava.

- Búsqueda de los afloramientos de aguas subsuperficiales.
- Conducción de aguas subsuperficiales.
- Sellamiento de grietas.
- Cubrimiento del área con vegetación multistrata.
- Evaluación de los materiales vegetativos empleados en el control de la erosión, para observar su capacidad de rebrote y su crecimiento a través del tiempo.
- Seguimiento periódico de las obras en las épocas lluviosas.
- Evaluación de costos de las prácticas de prevención y control de la erosión.
- Evaluación de la eficiencia de control (%) y de su persistencia (días).

### **Resultados y Discusión**

En el Cuadro 2 se presenta la distribución del flujo de agua en las cinco unidades de suelos escogidas para el ensayo (Federacafé, 1982; 1986). En los suelos derivados de cenizas volcánicas (Typic melanudans), predomina el flujo de agua por *percolación*.

- El flujo por percolación más alto se observó en la unidad Chinchiná, con valores de 104, 106 y 103 cm/h para los agregados de tamaños 1 a 2, 0.5 a 1 y < 0.5 mm de diámetro, respectivamente (Cuadro 2), que equivalen a 88%, 90% y 87% para cada tamaño, respectivamente.
- El flujo por percolación más bajo se observó en la unidad Guamal (Typic eutropepts), con valores de 39.6, 39.7 y 17.6 cm/h para



Cuadro 2. Distribución del flujo de agua (cm/h) en cinco suelos de la zona cafetera.

Unidad de suelo	Tamaño de partícula de suelo (mm)					
	1-2	0.5-1	< 0.5	1-2	0.5-1	< 0.5
	Flujo de escorrentía			Flujo de percolación		
Chinchiná (Typic melanudans)	6.69	6.76	9.53	104.13	106.42	103.02
Montenegro (Typic melanudans)	19.72	20.29	22.70	89.24	88.91	76.82
Fresno (Typic melanudans)	8.98	8.25	13.27	99.55	98.78	99.61
Guamal (Typic eutropepts)	64.76	68.49	87.97	39.63	39.67	17.65
Parnaso (Typic eutropepts)	7.03	6.68	47.76	102.90	103.03	55.29

FUENTE: Rivera et al. (1996b).

agregados de tamaño 1 a 2, 0.5 a 1 y < 0.5 mm de diámetro, respectivamente (Cuadro 2), que equivalen a 33.5%, 33.6% y 14.9% para cada tamaño, respectivamente.

- La unidad Parnaso (Typic eutropepts), así como los suelos derivados de cenizas volcánicas, presentan una percolación alta, especialmente cuando el tamaño de los agregados es de 1 a 2 y de 0.5 a 1 mm de diámetro; cuando el tamaño de los agregados es < 0.5 mm de diámetro, el flujo es bajo (55.29 cm/h).

Todos estos suelos manifiestan una tendencia a incrementar el flujo por escorrentía y a disminuir el flujo por percolación cuando el tamaño de los agregados del suelo disminuye de 2 mm a menos de 0.5 mm de diámetro. La unidad Guamal manifiesta un comportamiento opuesto al de las demás unidades de suelos en cuanto al flujo de agua por escorrentía y por percolación. En el Cuadro 3 se presentan cuatro tipos de procesos

relacionados con las pérdidas de suelo por erosión, a saber: pérdidas de suelo por escorrentía, por percolación, por dispersión de agregados y por deposición de suelo en el canal de escorrentía.

### ***Pérdidas de suelo por escorrentía***

Las pérdidas de suelo por escorrentía son muy bajas para todos los suelos y tamaños de agregados (excepto para los menores que 0.5 mm) en las unidades de suelos Chinchiná (Typic melanudans) y Guamal (Typic eutropepts), especialmente; los valores de pérdida de suelo son 0.114 (2.12%) y 11.2 kg/m<sup>2</sup> (52.68%), respectivamente (Cuadro 3).

### ***Pérdidas de suelo por percolación***

Las pérdidas de suelo por percolación son casi imperceptibles para las cinco unidades de suelos estudiadas; el valor promedio es de 0.00733 (0.41%) y 0.015 kg/m<sup>2</sup> (1.07%) para las unidades

Cuadro 3. Pérdidas de suelo debidas a la erosión (kg/m<sup>2</sup>) en cinco suelos de la zona cafetera.

Unidad de suelos	Tamaño de agregados en suelo (mm)																Total	Total medias
	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		
	Pérdida suelo por escorrentía				Pérdida suelo por percolación				Pérdida suelo por dispersión				Pérdida suelo en canal					
Chinchiná (Typic melanudans)	0.003	0.002	0.114	0.039	0.008	0.009	0.01	0.00733	0.22	0.996	2.79	1.3336	0.27	0.432	0.53	0.4097	5.37	1.79
Montenegro (Typic melanudans)	0.004	0.004	1.607	0.538	0.010	0.009	0.01	0.00933	0.16	0.364	3.66	1.3936	0.19	0.379	1.3	0.6247	7.70	2.57
Fresno (Typic melanudans)	0.001	0.001	0.218	0.073	0.007	0.008	0.01	0.00733	0.16	0.278	1.49	0.6430	0.35	0.525	0.55	0.4747	3.60	1.20
Guamal (Typic eutropepts)	1.467	0.985	11.20	4.550	0.018	0.012	0.01	0.01173	1.39	1.748	1.82	1.6536	0.70	0.987	0.92	0.8707	21.26	7.09
Parnaso (Typic eutropepts)	0.001	0.001	0.610	0.204	0.006	0.019	0.02	0.0150	0.20	0.743	0.65	0.5293	0.75	0.445	0.76	0.6523	4.20	1.40

FUENTE: Rivera et al. (1996b).

Chinchiná y Parnaso, respectivamente (Cuadro 3).

### ***Pérdidas de suelo por dispersión de agregados***

En 1988, R. Lal informaba (Bajracharya et al., 1992) que la susceptibilidad de un suelo a las fuerzas erosivas derivadas del impacto de las gotas de lluvia y del flujo superficial se considera, generalmente, una propiedad inherente a los suelos y de valor constante. Los suelos provenientes de cenizas volcánicas presentan, como promedios de esta pérdida de suelo y para las unidades Fresno y Chinchiná (Typic melanudans), los valores 0.64 y 1.33 kg/m<sup>2</sup>, respectivamente, que equivalen a 53.66% y a 74.49% de pérdida en relación con los demás procesos erosivos que afectan esos mismos suelos.

Resultados similares reportan Young y Wiersma (1973), quienes observaron que, al disminuir el impacto de la energía de la lluvia en un 89%, sin que bajara su intensidad, las pérdidas de suelo por erosión decrecieron en 90% o más; este hecho indica que el impacto de la lluvia es la fuerza que más arranca partículas de suelo. Asimismo, Watson y Laflen (1986) señalan que la erosión entre surcos se debe, principalmente, al impacto de las gotas de lluvia.

### ***Pérdidas de suelo por deposición en el canal de escorrentía***

En la parte baja de la bandeja del experimento hay una sección acanalada que se denomina canal de escorrentía; por él se mueve el suelo erosionado hasta el sitio de recolección de las muestras. El agua de escorrentía arrastra suelo en suspensión, parte del cual se separa y queda depositado en el canal de escorrentía; pues bien, este

material se considera en los cálculos de erodabilidad del suelo.

Estas pérdidas por deposición se dan principalmente en los suelos cuyos agregados tienen un tamaño < 0.5 mm (Cuadro 3). El valor más alto se presenta en la unidad Guamal (Typic eutropepts), o sea, 0.87 kg/m<sup>2</sup>, en promedio, que equivalen a 12.29% respecto a todos los procesos del mismo suelo; lo sigue la unidad Parnaso (Typic eutropepts), cuya pérdida de suelo, en promedio, es de 0.65 kg/m<sup>2</sup>, equivalente a 46.57% para los procesos dichos.

### ***Pérdidas totales de suelo por erosión***

En el Cuadro 3 se presentan los promedios de pérdida total de suelo por erosión. La unidad Guamal presenta la susceptibilidad a la erosión más alta (pérdida de suelo de 7.09 kg/m<sup>2</sup>); la siguen las unidades Montenegro (Typic melanudans) con 2.57 kg/m<sup>2</sup> y Chinchiná (Typic melanudans) con 1.79 kg/m<sup>2</sup>.

### ***Factor de erodabilidad del suelo K de la USLE***

En el Cuadro 4 se presentan los índices de los dos factores de erodabilidad, el K de la USLE y el K<sub>i</sub> de la WEPP, de cinco suelos de la zona cafetera. Los valores de K más altos se registraron en la unidad Guamal (Typic eutropepts) y fueron 0.093, 0.097 y 0.370 t·ha·h/MJ·mm·ha para agregados cuyo tamaño era de 1 a 2, de 0.5 a 1 y < 0.5 mm, respectivamente. Sigue a ésta la unidad Montenegro (Typic melanudans) con valores de 0.009, 0.020 y 0.172 t·ha·h/MJ·mm·ha para agregados de los tamaños respectivos antes indicados.

Los valores de K más bajos se presentaron en la unidad Fresno (Typic melanudans) y fueron 0.013, 0.020 y

Cuadro 4. Factores de erodabilidad,  $K_i$  y  $K$ , de tres tamaños de agregados (mm) en cinco suelos de la zona cafetera colombiana.

Unidad de suelos	Tamaño de agregados (mm)								
	1-2			0.5-1			< 0.5		
	Materia orgánica (%)			$K_i$ (kg·s/m <sup>4</sup> )			K (t·ha·h/MJ·mm·ha)		
Chinchiná (Typic melanudans)	15.9	13.7	12.5	1.91	5.53	13.25	0.013	0.037	0.090
Montenegro (Typic melanudans)	14.0	12.9	9.8	1.39	3.00	25.39	0.009	0.020	0.172
Fresno (Typic melanudans)	20.6	15.5	17.2	1.98	3.11	8.75	0.013	0.020	0.060
Guamal (Typic eutropepts)	3.8	4.8	3.1	13.76	14.39	53.94	0.093	0.097	0.370
Parnaso (Typic eutropepts)	8.4	7.8	6.6	2.05	3.86	11.50	0.014	0.026	0.080

0.06 t·ha·h/MJ·mm·ha para agregados de tamaño 1 a 2, 0.5 a 1 y < 0.5 mm, respectivamente. Siguen a ésta la unidad Parnaso (Typic eutropepts) con valores de 0.014, 0.026 y 0.08 t·ha·h/MJ·mm·ha para los respectivos tamaños de agregados ya indicados.

- Las regresiones lineales simples entre la M.O. (en porcentaje) y los factores de erodabilidad  $K_i$  (kg·s/m<sup>4</sup>) y  $K$  (t·ha·h/MJ·mm·ha) demuestran que, cuando se incrementa el contenido de M.O., los factores de erodabilidad decrecen. Los coeficientes de determinación son  $R^2 = 0.3417$  y  $R^2 = 0.3429$ , respectivamente, que son muy bajos comparados con el encontrado por Rivera (1990) para los mismos suelos, o sea,  $R^2 = 0.86$  (factor  $K$  de la USLE, solamente) empleando el nomograma de Wischmeier y Smith (1978).
- El ajuste que se hizo mediante regresión exponencial arrojó los coeficientes de determinación  $R^2 = 0.91$  y  $R^2 = 0.87$  para  $K_i$  (kg·s/m<sup>4</sup>) y  $K$  (t·ha·h/MJ·mm·ha), respectivamente.

## Manejo Integrado de Arvenses para Prevenir la Erosión

En 1982, a consecuencia de la alta degradación de los suelos por erosión, de la contaminación y del detrimento causado a la biodiversidad por el uso inadecuado de los herbicidas en el cultivo del café y en otros cultivos de la zona cafetera, se inició un proyecto de investigación sobre el manejo integrado de arvenses. Se entiende por arvense la vegetación que invade y convive con los cultivos, pastos y prados artificiales (Gómez et al., 1987).

Se investigó en las parcelas de escorrentía el uso oportuno y conveniente de los métodos manuales, del machete y de la guadañadora, y la aplicación racional de los herbicidas, con el fin de seleccionar las coberturas 'nobles' o los arvenses 'nobles'. Nobles son aquellas especies de plantas que no compiten económicamente con los cultivos, protegen el suelo de la erosión y regulan las aguas de escorrentía. Estos resultados fueron reportados por H. Rivera y A. Gómez en 1992, según una cita de Rivera (1993).

En investigaciones anteriores hechas por Cenicafé, se halló que una cobertura densa del suelo es la práctica más eficiente para conservar suelos y aguas (Gómez y Rivera, 1983; Suárez de C. y Rodríguez, 1962; Uribe, 1971). Se investigaron entonces los sistemas y equipos apropiados de aplicación de herbicidas, las dosis y frecuencias de éstos, las presiones y boquillas. También se estudiaron los herbicidas de menor impacto en el medio y de mayor seguridad para el operario y los demás seres vivos (Gómez et al., 1987).

La tecnología generada por el manejo integrado de arvenses, que es selectiva de las coberturas 'nobles', presenta dificultades con los equipos de aspersión de herbicidas, ya que se requiere de pantalla protectora para evitar la deriva del producto; es necesario, además, calibrar equipos y boquillas, adiestrar operarios y transportar volúmenes grandes de agua (150 a 200 lt/ha) (Gómez et al., 1987). Rivera (1995) desarrolló el equipo *selector de coberturas nobles*, SCN (Figura 1), antes mencionado, que reúne las ventajas y evita las desventajas de los equipos de aspersión tradicionales y garantiza, por tanto, el éxito de un programa de manejo integrado de arvenses (Figura 2).

Las principales ventajas del SCN son:

- Hace aplicaciones bajas y dirigidas de los herbicidas.
- Requiere un mínimo transporte de agua.
- No favorece la deriva del producto.
- Da seguridad al cultivo, al operario, a la fauna y a la flora.
- Requiere un equipo de poco peso, lo que permite al operario ser más eficiente y hacer la selección de las coberturas

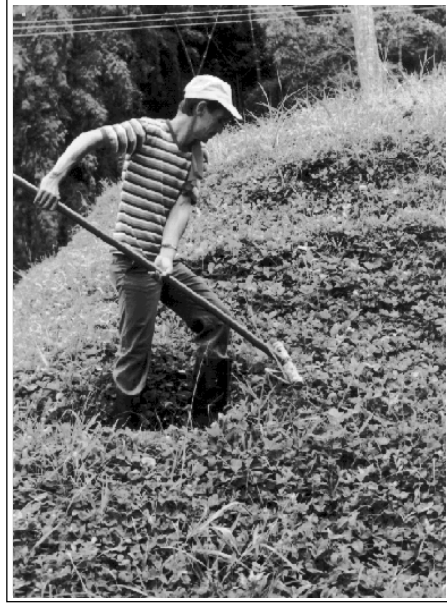


Figura 1. Una vista del equipo selector de coberturas 'nobles'.

nobles en forma práctica y sencilla del modo siguiente:

dirige la aplicación a las arvenses agresivas (más de 10 cm de altas) sin tocar las coberturas nobles ('parcheo');

no se hace aplicación a las arvenses trepadoras porque éstas deben eliminarse en las calles antes de que lleguen al cultivo.

- Es de fácil construcción: el mismo agricultor puede hacer el equipo.

El *procedimiento* empleado en el SCN es el siguiente: primero, poda con machete de las arvenses más agresivas para estimular su rebrote y su crecimiento rápido; segundo, control selectivo de esas arvenses tocándolas en su punto terminal (dos o tres hojas) con un herbicida sistémico<sup>1</sup> (se trasloca a la raíz y elimina la planta); tercero,



Figura 2. Lote en que han prosperado las coberturas 'nobles'.

las arvenses nobles (de porte bajo, generalmente) escapan al herbicida y su población domina el área. El control de las arvenses agresivas no puede ser sólo manual (con machete) porque se reproducen por semilla, por estolón y por esqueje y, en consecuencia, el corte no impide su desarrollo poblacional.

El Servicio de Extensión de la Federación Nacional de Cafeteros ha estimulado a los agricultores a aplicar este manejo integrado de arvenses organizando días de campo y empleando avances técnicos, videos, televisión y giras de agricultores de todo el país. Con esta tecnología se han reducido los costos de las desyerbas entre 85% y 90%, y se han protegido los suelos contra la erosión (de 95% a 97%).

1. Se ha ensayado con éxito glifosato en su formulación comercial de 480 i.a./lt. El SNC lo aplica al 10% (10 ml p.c./lt de agua).

## Control Biológico de Cárcavas de Tipo Remontante

Las cárcavas son zanjas más o menos profundas debidas a una socavación repetida del terreno, la cual es causada por el flujo incontrolado de agua que escurre ladera abajo (agua de escorrentía). Cuando una cárcava evoluciona creciendo hacia arriba y hacia los lados de la ladera, toma el nombre de *cárcava remontante* (Federacafé, 1975).

Se lograron buenos resultados en el control de estas cárcavas en las fincas cafeteras Providencia y La Aurora, ubicadas en el municipio de Palestina, Caldas, cuyas condiciones son las siguientes: altitud de 1500 m, precipitación promedio anual de 2378 mm, temperatura promedio anual de 22.5 °C y humedad relativa de 76%; suelos de la unidad Chinchiná (Typic

melanudans) con sustratos de esquistos anfibolíticos y grafíticos. En estas dos fincas se formó una cárcava remontante de 1.5 ha, aproximadamente (Figura 3).

- Se iniciaron los trabajos de control a partir de julio de 1991 con la evacuación de las aguas subsuperficiales y de escorrentía; esta labor preliminar contrarrestó los problemas causados por las avalanchas.
- Durante el primer año, el área se recuperó en un 70%; esta recuperación se constató mediante comparación de fotografías tomadas en diferentes épocas y desde un mismo sitio (Figuras 3 y 4).
- El costo del experimento se redujo a la mano de obra, ya que los

materiales necesarios para los tratamientos biológicos de control se encontraban en las dos fincas. Se invirtieron 290 jornales que equivalen, al cambio actual, a US\$3000; esta cantidad representa sólo el 50% del costo del estudio de inventario y diagnóstico del problema que hubiera hecho una firma de ingenieros. A la fecha, el área se encuentra totalmente recuperada y cubierta de vegetación multistrata en un 99%.

## Conclusiones

- En los suelos derivados de cenizas volcánicas (Typic melanudans) y en la unidad Parnaso (Typic eutropepts) de este estudio predomina el flujo de agua por percolación.



Figura 3. Cárcava remontante en las fincas Providencia y La Aurora, municipio de Palestina, en Caldas, Colombia, en enero de 1991 (vista superior).



Figura 4. Recuperación definitiva de la cárcava remontante de la Figura 3, en octubre de 1994 (vista superior).

- Entre los diferentes procesos de pérdida de suelo antes descritos, el que más favorece la erosión es la dispersión de partículas por efecto del impacto de la lluvia en los suelos totalmente desnudos, especialmente en los derivados de cenizas volcánicas (Typic melanudans).
- Cuando se incrementa el contenido de M.O., los factores de erodabilidad decrecen; esta relación tiene coeficientes de determinación altamente significativos:  $R^2 = 0.3417$  y  $R^2 = 0.3429$  para  $K_i$  ( $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^4$ ) y para  $K$  ( $\text{t}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}/\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}$ ), respectivamente.
- El programa Manejo Integrado de Arvenses, junto con su equipo selector de arvenses, se presenta

como un incentivo económico para el agricultor porque, permitiendo la dominancia de arvenses 'nobles', ofrece la máxima protección del suelo contra la erosión con una eficiencia del 95% al 97%.

- Los resultados satisfactorios que arroja el control de cárcavas de tipo remontante empleando tratamientos biológicos demuestran que estas cárcavas, en su mayoría, son fácilmente controlables, siempre y cuando se identifiquen oportunamente las causas del problema.

## Referencias

- Bajracharya, R. M.; Elliot, W. J.; y Lal, R. 1992. Interhill erodibility of some Ohio soils based on field simulation. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 267-272.



- Federacafé (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia). 1975. Manual de conservación de suelos de ladera. 1a. ed. Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé), Chinchiná, Colombia. 267 p.
- Federacafé (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia). 1982. Estudio de zonificación y de uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Caldas. Federacafé y Programa de Desarrollo y Diversificación de Zonas Cafeteras (Prodesarrollo), Santafé de Bogotá, Colombia. 309 p.
- Federacafé (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia). 1986. Estudio de zonificación y de uso potencial del departamento del Quindío. Federacafé y Programa de Desarrollo y Diversificación de Zonas Cafeteras (Prodesarrollo), Santafé de Bogotá, Colombia. 162 p.
- Fournier, F. 1975. Conservación de suelos. Mundi Prensa, Madrid, España. 254 p.
- Gómez A., A.; Ramírez H., C. J.; Cruz K., R. G.; y Rivera P., H. 1987. Manejo y control integrado de malezas en cafetales y potreros de la zona cafetera. Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé)/ Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Federacafé), Chinchiná, Colombia. 254 p.
- Gómez A., A. y Rivera P., H. 1983. Dinámica de población de coberturas en cafetales al sol, manejadas integralmente con herbicidas, machete y azadón. Trabajo presentado al seminario COMALFI 15 años celebrado en Tibaitatá (CORPOICA), 26-28 enero 1983. Sociedad Colombiana de Malezas y Fisiología Vegetal (COMALFI), Santafé de Bogotá, Colombia. 35 p. (Mecanografiado.)
- Hudson, N. 1982. Conservación de suelos. Reverté, Barcelona, España. 335 p.
- Lal, R. y Elliot, W. 1994. Erodibility and erosivity. En: Lal, R. (ed.). Soil erosion research methods. 2a. ed. St. Lucie Press, Ankeny, Iowa, E. U. p. 181-208.
- Nearing, M. A.; Foster, G. R.; Lane, L. J.; y Finkner, S. C. 1989. A process-based soil erosion model for USDA: Water erosion prediction project technology. Trans. ASAE 32(5):1587-1593.
- Rivera P., H. 1990. Determinación de los índices de erosividad, erodabilidad y erosión potencial en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). Tesis (M.Sc.). Universidad Nacional de Colombia, Palmira. 310 p.
- Rivera P., H. 1993. Disciplina de conservación de suelos. En: Informe Anual de labores 1992-93. Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé), Chinchiná, Colombia. 35 p.
- Rivera P., H. 1995. Establezca coberturas nobles en su cafetal utilizando el selector de arvenses. Avances Técnicos Cenicafé (Colombia) 235:1-8.
- Rivera P., H.; Lal, R.; Amézquita C., E.; Mesa S., O.; Chaves C., B. 1996a. Determinación de la erodabilidad de cinco suelos de la zona cafetera central colombiana mediante el uso de un simulador de lluvias. Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé), Chinchiná, Colombia. 11 p.
- Rivera P., H.; Lal, R.; Amézquita C., E.; Mesa S., O.; y Chaves C., B. 1996b. Procesos dinámicos fundamentales en la erosión de cinco suelos de la zona cafetera central colombiana mediante el uso de un simulador de lluvias. Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé), Chinchiná, Colombia. 13 p.
- Suárez de C., F. y Rodríguez G., A. 1962. Investigaciones sobre la erosión y la conservación de los suelos en Colombia. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Federacafé). 473 p.

- Truman, C. C. y Bradford, J. M. 1995. Laboratory determination of interrill soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:519-526.
- Uribe H., A. 1971. Erosión y conservación de suelos en café y otros cultivos. *Cenicafé (Colombia)* 22(1):1-17.
- Watson, D. A. y Lafflen, J. M. 1986. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. *Trans. ASAE* 29(1):98-102.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. *Agricultural Handbook no. 282.* United States Department of Agriculture (USDA), Washington D.C., E. U.
- Young, R. A. y Wiersma, J. L. 1973. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. *Water Resour. Res.* 9(6):1629-1636.

## CAPÍTULO 4

# Efecto de las Barreras Vivas y de las Coberturas en la Conservación de los Suelos en Diferentes Sistemas de Producción Agrícola

Oscar S. Rodríguez P.\*

### Resumen

Las coberturas de plantas vivas, sean éstas especies cultivadas o silvestres, y sus residuos protegen la superficie del suelo de los procesos erosivos que lo degradan. El grado de protección varía según el nivel de cobertura y las condiciones del sitio. En algunos casos, la cobertura se complementa con otras prácticas de conservación como las barreras vivas, las zanjas, las terrazas y los muros.

Este capítulo resume la información obtenida en parcelas de erosión, bajo condiciones de lluvia natural y de lluvia simulada, acerca del efecto de las barreras vivas y de las coberturas en la protección de los suelos contra la erosión hídrica, en diferentes sistemas de producción; el marco de referencia y la sistematización de los datos provienen de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS).

En los sistemas naturales en que hay poca o ninguna intervención del hombre, se presentan los *valores más bajos de CP* (interacción de la Cobertura de los cultivos y las Prácticas de conservación).<sup>1</sup>

En bosques y pastizales densos, el valor de *CP* es menor que 0.001 y las pérdidas de suelos son muy bajas. En los sistemas de labranza cero o donde se producen grandes cantidades de residuos, como en los cultivos de frutales permanentes, el producto *CP* oscila entre 0.001 y 0.1. En los sistemas de producción altamente intervenidos, en los que hay cultivos de ciclo corto y escardas o labores frecuentes, el valor de *CP* es mayor que 0.1, lo que indica que las pérdidas de suelo son más altas.

Los *residuos en la superficie* del suelo son muy eficientes contra la erosión cuando sobrepasan los 3 Mg/ha (Mg = megagramo = 1 tonelada métrica), cantidad que alcanza para cubrir entre un 30% y un 50% de la superficie. Respecto a la erosión, las expresiones matemáticas desarrolladas para la pérdida de suelo en función de la aplicación de coberturas ('mulch') muestran un comportamiento exponencial negativo, similar al que se reporta en la literatura.

Las *barreras vivas*, consideradas solas o junto con cultivos y otras prácticas, y espaciadas a diferentes distancias, tienen valores de *CP* menores que 0.001 al asociarse con altos niveles de residuos o cultivos permanentes, y llegan a valores de 0.53 cuando están solas y en su

\* I.A., M.Sc., Profesor, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela

1. En la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo de Wischmeier y Smith (1978), es el producto del factor C ('Cropping factor') y del factor P (que representa las Prácticas especiales de conservación).

primer año de establecimiento, tiempo en que aún no brindan una buena protección.

En la medida en que los *sistemas de cultivo* se asemejen a los sistemas naturales y puedan manejarse para obtener un nivel de cobertura alto —tanto con su dosel o copa como con los residuos acumulados en la superficie— darán al suelo un grado de protección contra la erosión cada vez mayor. Tal es el caso de los cultivos permanentes y de los sistemas de mínima labranza.

Cuando se requiera emplear un sistema de cultivo que implique mayor intervención del terreno y menor cobertura, debe complementarse este sistema con otras prácticas de conservación; las barreras vivas son, en este caso, una alternativa muy prometedora. Se presenta aquí un cuadro guía para espaciar barreras vivas en campos de cultivo; en él se asigna un intervalo vertical según las condiciones de erosividad y de erodabilidad y según el sistema de cultivo de que se trate.

## Introducción

Las coberturas del suelo ('mulch') controlan el proceso de erosión hídrica porque tienen un doble papel: primero, reducen el impacto de las gotas de lluvia disipando su energía; segundo, ayudan a mantener una buena infiltración del agua y disminuyen la cantidad, la velocidad y la capacidad de transporte del flujo de agua sobre el suelo.

En un sentido amplio, las *coberturas* comprenden las plantas vivas, ya sea cultivadas o no, y los residuos que éstas arrojan; otros materiales pueden cumplir también una función similar. Por tanto, la cobertura como medio de protección contra la erosión hídrica se ajusta al principio de que cada suelo debe ser utilizado según su capacidad. Si la sola

cobertura es insuficiente para proteger el suelo de un proceso erosivo, deben adoptarse prácticas de manejo y conservación del suelo que sean complementarias, como las barreras vivas, las zanjas, las terrazas, los muros y otras (Rodríguez y Páez, 1986).

Páez y Rodríguez (1984) y Páez (1995), basándose en los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), desarrollada por Wischmeier y Smith en 1978, establecieron un criterio para clasificar y evaluar tierras según su *vulnerabilidad a la erosión hídrica*. El criterio consiste en asignar valores máximos del factor  $CP$  de la EUPS a las unidades de tierra evaluadas como " $CP_{max}$ ":

- valores altos de  $CP_{max}$  indican baja vulnerabilidad a la erosión y pocos requerimientos de manejo y conservación del suelo;
- valores bajos de  $CP_{max}$  indican una severa vulnerabilidad a la erosión hídrica y muchos requerimientos para el manejo y conservación del suelo.

Puede evaluarse además el *grado de protección* ofrecido por los cultivos y por otros tipos de vegetación ( $C$ ) así como el que dan las prácticas de manejo y conservación ( $P$ ), y establecer valores de esos factores, o sea,  $C$  (cultivo y manejo) y  $P$  (prácticas), y también de  $CP$  (interacción del cultivo con su manejo y sus prácticas):

- valores de  $C$ ,  $P$  o  $CP$  altos, es decir, cercanos a 1 (o aún mayores) indican una deficiente protección contra la erosión;
- valores muy bajos de esos factores indican un alto grado de protección.

Partiendo de la vulnerabilidad a la erosión hídrica de una unidad de tierra y del grado de protección que dan a

ésta las prácticas de manejo y conservación de un sistema de producción dado, puede establecerse una *guía o principio general* para seleccionar usos y prácticas. Esta guía mantendría las pérdidas de suelo debidas a la erosión por debajo de los límites de tolerancia establecidos, en los que se cumple la siguiente relación:

$$\frac{CP_{\text{(uso y prácticas de manejo determinados)}}}{CP_{\text{max (valor tolerable en unidad de tierra dada)}} \leq$$

Para aplicar este principio debe contarse con la información necesaria, es decir, los niveles de vulnerabilidad a la erosión hídrica de las unidades de tierra que se estudian, el grado de protección ofrecido por las coberturas, y la eficiencia de las distintas prácticas de manejo y conservación del suelo.

En este artículo se resume la información obtenida por diferentes autores en parcelas de erosión, tanto bajo condiciones de lluvia natural como de lluvia simulada, sobre el efecto que hacen en el suelo las barreras vivas y las coberturas, es decir, la protección que éstas dan contra la erosión hídrica; se estudiaron diferentes sistemas de producción, usando el factor *CP* de la EUPS como indicador (Wischmeier y Smith, 1978).

Se elaboró también una tabla (Cuadro 3), teniendo como marco de referencia los factores de la EUPS. Este cuadro servirá de guía para asignar el intervalo vertical de espacio que separaría una barrera viva de otra en el campo.

## Materiales y Métodos

El estudio de las parcelas de erosión antes descrito hace énfasis en la práctica de las barreras vivas. Se reportan además datos sobre la cobertura ofrecida al suelo por la vegetación natural y por los residuos acumulados en la superficie.

Las parcelas de erosión difieren en sus dimensiones y en el sistema colector/separador de agua y suelo para el muestreo. Están ubicadas en distintas localidades cuyas características climáticas, edáficas y de relieve se resumen en el Cuadro 1.

Se utilizó un simulador de lluvia con boquilla (Rodríguez y Rodríguez, 1989) para evaluar el efecto que tenían los niveles de residuos en la superficie y en las barreras vivas cuando se aplicaba un generador de escorrentía, aguas arriba de las parcelas de erosión; estas parcelas diferían respecto a la longitud equivalente, es decir, la de la parcela estándar del modelo USLE (EUPS) (Rodríguez, 1997).

## Resultados y Discusión

En el Cuadro 2 se presentan los valores de *CP* que ofrecen diferentes sistemas de producción, diversas coberturas y distintas prácticas de manejo y conservación de suelos, en diferentes condiciones agroecológicas.

- Los *cultivos anuales mecanizados* de cereales como el maíz, el sorgo y el trigo presentan valores de *CP* entre 0.22 y 0.65. Cuando se aplica al maíz la *labranza en contorno* (siembra a través de la pendiente), el valor de *CP* se reduce aproximadamente a la mitad y en la misma proporción se reducen las pérdidas de suelo. En una unidad de tierra de baja vulnerabilidad a la erosión, esta práctica sería efectiva para mantener los niveles de erosión en límites tolerables; si la unidad es vulnerable a la erosión, esta práctica, por sí sola, no sería suficiente.
- Las *franjas en contorno* y las franjas amortiguadoras (barreras vivas y franjas con vegetación) logran reducir hasta en 30 veces los valores de *CP*; su eficiencia aumenta cuando la cobertura de la

Cuadro 1. Características de los sitios en que se localizan las parcelas de erosión del ensayo.

Localidad	Biozona	Precipitación media (mm)	EI <sub>30</sub> anual <sup>a</sup> (MJ·mm/ha·h)	Suelo	Erodabilidad, K	Paisaje o ecosistema	Rango de pendiente (%)
Maracay	Bosque seco premontano <sup>b</sup>	922	6230	Cumulic Haplustoll	0.014-0.044	Piedemonte	6-17
Chaguaramas	Bosque seco tropical <sup>b</sup>	821	5610	Typic haplustalf	0.036-0.060	Colinas	4-6
Yaritagua	Bosque seco tropical <sup>b</sup>	842	4510	Oxic paleustalf	0.023	Valle	4
Petaquire	Transición, bosque seco a bosque húmedo montano bajo	860	2613	Aquic paleudult	0.013-0.028	Ladera de montaña	15-36
				Orthoxic Tropudult	0.001-0.011		42-70

- a. Fórmula para calcular el factor de erosividad de la EUPS como el producto de la energía total de las lluvias (E) por su intensidad máxima en 30 minutos (I<sub>30</sub>). Se mide en la unidad indicada.
- b. Se presentan lluvias extremas con mayor frecuencia.

franja protectora o amortiguadora es un pasto.

- La *labranza cero* logra un nivel de eficiencia similar, siempre y cuando la cantidad de residuos en la superficie sea la adecuada; en ausencia de residuos, su eficiencia es casi igual a la de la labranza en contorno.
- Las *hortalizas*, evaluadas en la localidad de Petaquire, presentan durante su corto ciclo valores de *CP* que están en el rango de 0.1 a 0.9; el grado de protección que ofrecen es, en general, muy bajo y menor que el de los cereales.
- Los *residuos* ('mulch') pueden ser muy eficientes si se aplican localmente y al inicio del ciclo de cultivo; así ocurrió en los años agrícolas 1984-85, 1989 y 1990. Si la aplicación del residuo es tardía, no da el grado de protección que requiere la superficie del suelo al inicio del ciclo de cultivo y ésta queda expuesta a las lluvias intensas; así ocurrió en 1988.
- Los *surcos en contorno* y las *platabandas* dan una eficiencia en la protección del suelo similar a la que da la labranza en contorno en el cultivo de cereales. Por sí solos no son suficientes para reducir las pérdidas de suelo a límites tolerables, en las condiciones de vulnerabilidad a la erosión que presentan las laderas y vertientes de pendientes pronunciadas; en estos ambientes hay sistemas de producción de cereales.
- Los *cultivos de subsistencia*, representados por el sistema de cultivos asociados, dan mayor grado de protección que los cereales y las hortalizas; sus valores de *CP* están en el rango de 0.01 a 0.08, los cuales dependen mucho de la intervención que represente la

preparación del suelo y el control de malezas. El cultivo manual y las plantas de diferente hábito de crecimiento dan a estos sistemas una capacidad de protección mayor. En algunos casos se requieren prácticas suplementarias para evitar la degradación de esos sistemas que son, generalmente, susceptibles a los procesos erosivos.

- Los *cultivos permanentes*, representados por frutales como el duraznero, tienen valores de *CP* muy bajos: desde  $< 0.001$  hasta 0.15, según el tipo de control de malezas aplicado (químico o mecánico) y según su intensidad. Similares resultados reportan Useche et al. (1986) para el cultivo de café a plena exposición solar, donde el *CP* varía desde 0.088 con cobertura de vegetación natural limpiada a machete, sin remover el suelo, hasta 0.396 cuando se limpia con pala, es decir, removiendo sólo la capa superficial de suelo a medida que se corta la vegetación. En terrenos con pastos se obtuvieron valores de *CP* que van desde muy bajos (de  $< 0.0001$  a 0.047) en el pasto Taiwan para corte ya establecido y con una cobertura densa, hasta relativamente altos (0.12 a 0.22) en otros pastos durante el año de establecimiento.
- Las *coberturas permanentes* y no intervenidas de bosques naturales y protectores presentaron valores de *CP* desde muy bajos ( $< 0.0001$ ) hasta menos bajos (0.017). El bosque de pinos dio valores ligeramente superiores a los que tienen los bosques naturales; esto puede deberse a la muy baja o nula diversidad del sotobosque. Los bosques y pastos densos presentan el grado de protección más alto contra la degradación del suelo por efecto de la erosión hídrica.

Cuadro 2. Valores del factor CP para diferentes sistemas de producción y para diversas coberturas del suelo, obtenidos en parcelas de erosión que recibieron lluvias naturales, en distintas condiciones agroecológicas.

Localidad	Biozona y tipo de suelo	Año	Longitud de la parcela (m)	Pendiente del terreno (%)	Sistema de producción Uso de la tierra o cobertura <sup>a</sup>	Manejo y prácticas de conservación del suelo	Factor CP (EUPS) <sup>b</sup>	Fuente			
MARACAY	Bosque seco premontano  Suelo: Cumulic haplustoll	1981	22	15	CAM Maíz/canavalia	Labranza convencional, cultivo en franjas de contorno	0.09	Páez y Rodríguez, 1989			
					CS Maíz, yuca, ñame	Cultivos asociados	0.08				
		1982			CAM Maíz/millo	Labranza convencional, cultivo en franjas de contorno	0.04		Rodríguez et al., 1982		
					CS Maíz, yuca, ahuyama	Cultivos asociados	0.001				
		1983			CAM Maíz en monocultivo	Labranza convencional en sentido de la pendiente	0.30		Rodríguez et al., 1982		
					CAM Maíz/barbecho	Labranza convencional, franjas en contorno	0.03				
					CS Maíz, yuca, ahuyama	Cultivos asociados	0.03				
		40			17	Bosque seco semideciduo	Suelo sin intervención	0.0001	Páez y Rodríguez, 1992; 1995		
					6	CAM Maíz/pasto	Labranza convencional, franjas en contorno y rotación	0.02			
		1985			20	15	CAM Maíz en monocultivo	Labranza convencional en sentido de la pendiente		0.22	
								Labranza convencional en contorno		0.14	
							CPP Pasto	Labranza convencional, año inicial de establecimiento		0.21	
							CS Maíz, yuca, ahuyama	Cultivos asociados		0.03	
		30			17	Bosque seco semideciduo	Suelo sin intervención	0.0001			
					15	CAM Maíz/pasto	Franja amortiguadora (5 m ancho)	0.01			
CHAGUARAMAS	Bosque seco tropical  Suelo: Typic haplustalf	1981	22	6	CAM Sorgo/canavalia	Labranza convencional, franjas en contorno	0.02	Páez y Rodríguez, 1989			
		1982			CAM Sorgo/barbecho	Labranza convencional, franjas en contorno	0.04				
		1983			CAM Sorgo en monocultivo	Siembra a voleo, labranza convencional	0.23				
						Siembra en hileras, labranza cero	0.02				
		1985	20	4	CAM Sorgo en monocultivo	Siembra en hileras, labranza convencional en sentido de la pendiente	0.65	Páez y Rodríguez, 1992; 1995			
						Siembra en hileras, labranza convencional en sentido de la pendiente	0.52				
						Siembra en hileras, labranza cero	0.06				
			CPP Pasto	Año de establecimiento	0.12						
		YARITAGUA	Bosque seco tropical  Suelo: Oxíc paleustalf	1985	20	4	CAM Maíz en monocultivo		Siembra en hileras, labranza convencional en sentido de la pendiente	0.54	Páez y Rodríguez, 1992; 1995
									Siembra en hileras, labranza convencional en contorno	0.32	
Siembra en hileras, labranza cero	0.03										
PETAQUIRE Estación Experimental Bajo Seco UCV	Transición: Bosque seco a bosque húmedo montano bajo  Suelo: Aquic paleudult	1984-1985	10	20	CHPA Zanahoria/remolacha	Platabandas	0.36	Fernández, 1989			
			20	15		Platabandas	0.20				
			20	15		Platabandas + 'mulch' (4.5 Mg/ha)	0.008				
		1986	10	15	CHPA Repollo/coliflor	Surcos en contorno	0.21	Fernández, 1995a			
						Surcos en contorno	0.13				
						Terreno liso	0.26				
		1988	10	15	CHPA Zanahoria y lechuga	Terreno liso	0.90	Rodríguez et al., 1989			
						Surcos en contorno	0.70				
						Platabanda	0.30	Rodríguez y Fernández, 1982			
						Terreno liso + 'mulch' (5 Mg/ha)	0.50				
						Platabanda + 'mulch' (5 Mg/ha)	0.50				
		1989A	15	15	CHPA Remolacha	Terreno liso	0.06	Syoufi, 1990			
						Terreno liso + 'mulch' (5 Mg/ha)	0.02				
					36	CPP Pasto	Pasto Taiwan denso para corte		0.0004		
		1989B	10	15	CAM Trigo	En hileras, labranza convencional	0.52	Urbina y Rodríguez, 1995			
						En hileras, labranza convencional + emulsión asfalto <sup>c</sup>	0.13				
				20		En hileras, labranza cero sin residuos	0.25				
						En hileras, labranza cero + 'mulch' (5 Mg/ha)	0.006				
		1990	10	15	CHPA Papa	Pasto Taiwan denso para corte	0.047	Castillo, 1991			
						Terreno liso	0.07				
						Surcos en contorno	0.02				
1991	10	15	CHPA Zanahoria, remolacha ajoporro	Terreno liso + 'mulch' (5 Mg/ha)	0.025	Fernández, 1995b					
				Surcos en contorno + 'mulch' (5 Mg/ha)	0.0004						
			36	CPP Pasto	Pasto Taiwan denso para corte		< 0.0001				
1989-1991	Transición: Bosque seco a bosque húmedo montano bajo  Suelo: Orthoxic tropoudult	1989	11	42	CPF Durazno	Durazno en terrazas individuales	0.15	Fernández, 1995b			
									0.15		
									< 0.001		
		1990	10	70	Bosque natural	No intervención	0.0001	Urbina y Rodríguez, 1995			
						Bosque de pinos	0.0001				
						Bosque natural	0.017				
						Bosque de pinos	0.079				
1991	10	70	Bosque natural		< 0.0001						
				Bosque de pinos	0.0002						

a. CAM = Cultivos anuales mecanizados; CS = Cultivos de subsistencia; CPP = Cultivos permanentes de pastos; CHPA = Cultivo de hortalizas de piso alto;

CPF = Cultivos permanentes de frutales.

b. CP = Coberturas (grado de protección del suelo); Prácticas (eficiencia de sistema de producción + manejo); EUPS = ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, en inglés).

c. Producto sintético para acondicionar la superficie de algunos suelos; reduce el riesgo de disipación de los agregados en la superficie del suelo. El procedimiento de sellado es costoso.



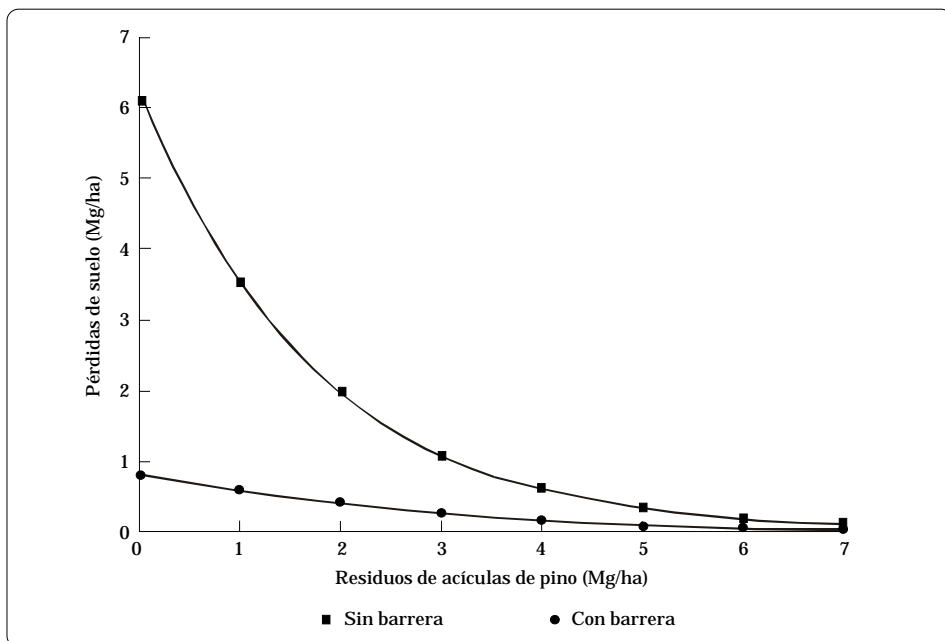


Figura 1. Pérdidas de suelo en función del nivel de cobertura de acículas de pino, con barrera de vetiver y sin barrera (pendiente: 15%; lluvia simulada).

FUENTE: Rodríguez (1997).

- Los *sistemas de cultivo semejantes a los naturales*, cuyo manejo permita tener un alto nivel de cobertura tanto con el dosel o copa como con los residuos de la superficie, ofrecen mayor grado de protección al suelo contra la erosión. Así ocurre con los cultivos permanentes y los sistemas de mínima labranza. En la Figura 1 se observa la eficiencia de los residuos de la superficie para disminuir las pérdidas de suelo, a medida que aumenta el nivel de residuos aplicados:
  - con 3 Mg/ha de residuos,<sup>2</sup> las pérdidas de suelo se reducen en más del 90%;

- con 1 a 2 Mg/ha de residuos (un nivel relativamente bajo que ofrece de 30% a 50% de cobertura), las pérdidas de suelo se reducirían en un poco más del 50%.

Si es necesario emplear un sistema de cultivo que implique mayor intervención y menor cobertura del suelo, el sistema debe complementarse con otras prácticas de conservación, como las *barreras vivas*. Esta alternativa es prometedora por su gran efectividad, su bajo costo y su carácter permanente; además, protegen los predios en períodos críticos de baja cobertura, por ejemplo, en la época de preparación del suelo y —en cultivos como la papa— durante la cosecha.

Algunos valores de *CP* correspondientes a sistemas de cultivos asociados con barreras vivas se

2. Mg = megagramo, que equivale a 1 t (1 tonelada métrica).

reportan en el Cuadro 3. Las barreras vivas, evaluadas solas o junto con cultivos y otras prácticas agronómicas, y espaciadas a diferentes distancias, dan valores de *CP* que varían desde  $< 0.001$  —cuando se asocian con un nivel alto de residuos o con cultivos permanentes— hasta 0.53, cuando están solas y en su primer año de establecimiento. La Figura 1 indica que, cuando los residuos no existen o son muy pocos, la barrera viva sí protege el terreno, sobre todo en los períodos críticos en que el sistema de cultivo no ofrece una protección adecuada. La Figura 2 muestra dos cosas:

- el efecto que tiene la diferente longitud del lote protegido en la eficiencia de las barreras vivas de vetiver; y
- la interacción de esas longitudes con un nivel alto (5 Mg/ha) de residuos acumulados en la superficie.

Partiendo de las experiencias obtenidas con barreras vivas en las parcelas de erosión, el Cuadro 4 presenta una guía para asignar el Intervalo Vertical (I.V.); con éste se determina el espacio que debe haber entre una barrera y otra a lo largo de la pendiente, según las condiciones de erosividad y erodabilidad imperantes y del sistema de cultivo aplicado. Esta guía debe ser ajustada según las experiencias y factores ambientales propios de otras localidades.

### Conclusiones

- El *valor CP*, basado en los factores de la EUPS, sirve para definir el grado de protección ofrecido por un sistema de producción agrícola o por una cobertura determinada. Por tanto, es una guía para seleccionar alternativas sostenibles de uso del suelo según la vulnerabilidad de las unidades de tierra a la erosión hídrica. Las

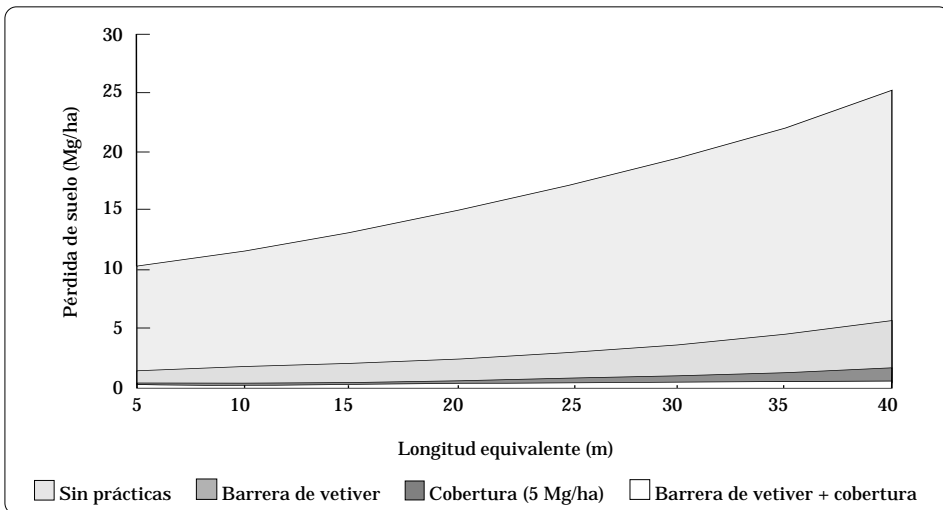


Figura 2. Efecto combinado de la longitud equivalente de la parcela, de los residuos de cobertura (5 Mg/ha) y de la barrera de vetiver en las pérdidas de suelo de la parcela, en las siguientes condiciones: suelo saturado de humedad, 15% de pendiente, y lluvia y escorrentía simuladas.

FUENTE: Rodríguez (1997).

Cuadro 3. Evaluación de la eficiencia de las barreras vivas bajo condiciones de lluvia natural y en diversos ambientes agroecológicos.<sup>a</sup>

Material vegetativo	Localidad	Año	Biozona	Pendiente del terreno (%)	Longitud de la parcela (m)	Espaciamiento entre BV (m)	Manejo dado entre BV	Factor CP	Fuente
<i>Cenchrus ciliaris</i> (cadillo bobo)	MARACAY	1980	Bosque seco premontano <b>Suelo:</b> Cumulic haplustoll	15	22	11.5	Suelo desnudo (1 BV)	0.53	Rodríguez et al., 1982 Páez y Rodríguez, 1989
		1981						0.37	
		1982						0.25	
		1985					15	20	20
	10	10	0.07						
<i>Andropogon gayanus</i>	CHAGUARAMAS	1985	Bosque seco tropical <b>Suelo:</b> Typic paleustalf	4	20	20	Sorgo, labranza convencional (1 BV)	0.22	Páez y Rodríguez, 1992
					30	30		0.27	
<i>Andropogon gayanus</i>	YARITAGUA	1985	Bosque seco tropical <b>Suelo:</b> Oxic paleustalf	4	15	15	Maíz, labranza convencional (1 BV)	0.12	Páez y Rodríguez, 1992
					20	20		0.12	
					30	30		0.25	
<i>Vetiveria zizanioides</i> (vetiver)	PETAQUIRE Estación Experimental Bajo Seco UCV	1984-1985	Transición: Bosque seco a bosque húmedo mmano bajo <b>Suelo:</b> Aquic paleudult	15	20	10	Secuencia remolacha/zanahoria, platabandas (2 BV)	0.008	Fernández, 1989
		1986		15	20	10	Secuencia repollo/coliflor, en surcos (2 BV)	0.001	Fernández, 1995a
		1988		15	10	10	Secuencia zanahoria/lechuga, sistemas varios de preparación de tierras (1 BV)	0.13	Rodríguez et al., 1995 Rodríguez y Fernández, 1992
		1989A		15	10	10	Remolacha, terreno liso (1 BV)	0.01	Syoufi, 1990
		1989B		15	10	10	Trigo en hileras, labranza cero (1 BV)	0.11	Urbina y Rodríguez, 1995
		1989		42	11	10	Durazno en terrazas individuales (1 BV)	< 0.001	Castillo, 1991 Fernández, 1995b Syoufi, 1990 Urbina y Rodríguez, 1995
		1990						0.004	
		1991						< 0.001	
		1992						< 0.001	
		1990		15	10	10	Papa en surcos (1 BV)	0.006	Castillo, 1991
		1991		15	10	10	Zanahoria, remolacha y ajoporro, 2 ciclos (1 BV)	0.0016	Fernández, 1995b
		1992		15	10	10	Mulch, 1.5 a 5 Mg/ha (1 BV)	< 0.001	Fernández, 1995c

a. BV = barreras vivas; CP = Cobertura · Prácticas (ver Cuadro 2, nota b.).

Cuadro 4. Valores indicativos del intervalo vertical (I.V.) con que se espacian entre sí las barreras vivas en función de la erosividad, la erodabilidad y la intensidad del cultivo.<sup>a</sup>

Rango de erosividad de la lluvia (Mg/ha)/(MJ-mm/ha-h)	Rango de erodabilidad del suelo (MJ-mm/ha-h)	Alta intensidad de cultivo <sup>b</sup>		Moderada intensidad de cultivo <sup>c</sup>		Baja intensidad de cultivo <sup>d</sup>	
		I.V.	Máxima <sup>e</sup> pendiente (%)	I.V.	Máxima <sup>e</sup> pendiente (%)	I.V.	Máxima <sup>e</sup> pendiente (%)
Baja, < 3000	Baja < 0.02	4	44	5	58	6	75
	Media 0.02-0.05	3	31	4	44	5	58
	Alta > 0.05	2	20	3	31	4	44
Intermedia, 3000-7000	Baja < 0.02	3	31	4	44	5	58
	Media 0.02-0.05	2	20	3	31	4	44
	Alta > 0.05	1	10	2	20	3	31
Alta, > 7000	Baja < 0.02	2	20	3	31	4	44
	Media 0.02-0.05	1	10	2	20	3	31
	Alta > 0.05	0.5	5	1	10	2	20

- Si la pérdida de suelo es menor que 12 Mg/ha, el I.V. se moverá hacia abajo dentro de la columna hasta encontrar el que se ajusta a las mayores restricciones que acompañan el nivel de tolerancia asignado.
- Alta intensidad de cultivo: cultivos anuales en que hay poca o ninguna cobertura de residuos.
- Moderada intensidad de cultivo: (a) cultivos anuales en que hay una moderada cobertura de residuos; (b) cultivos semipermanentes con moderada cobertura de residuos; (c) cultivos permanentes con moderada cobertura de residuos
- Baja intensidad de cultivo: (a) cultivos anuales en que la cobertura de residuos es muy alta; (b) cultivos semipermanentes con alta cobertura de residuos; (c) cultivos permanentes con alta cobertura de residuos.
- La máxima pendiente fue calculada partiendo de una distancia mínima entre barreras de 10 m.

FUENTE: Rodríguez (1997).

prácticas de manejo y de conservación que estas unidades requieren se seleccionan de manera que se cumpla el siguiente principio, ya explicado:

$$\frac{CP_{\text{(uso y prácticas de manejo determinados)}}}{CP_{\text{max (valor tolerable en unidad de tierra dada)}}} \leq$$

- En la medida en que los *sistemas de cultivo* se asemejen a los sistemas naturales, y que su manejo permita altos niveles de cobertura, ofrecen al suelo un mayor grado de protección contra la erosión. Tal es el caso de los cultivos permanentes y de los sistemas de mínima labranza y de cobertura del suelo.
- Las *barreras vivas* son una alternativa prometedora como práctica de conservación complementaria, es decir, cuando el grado de protección ofrecido por el sistema de cultivo es insuficiente y no es factible el cambio por otro sistema de mayor protección.

## Referencias

Nota: *Alcance* es la revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, en Maracay.

- Castillo, M. A. 1991. Evaluación de sistemas de conservación de suelos y aguas en áreas montañosas bajo cultivo de papa, durazno y otras coberturas permanentes. Tesis. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay. 76 p.
- Fernández, N. 1989. Evaluación de prácticas de conservación de suelos en cultivos hortícolas. *Alcance* (Maracay, Venezuela) 37:87-96.
- Fernández, N. 1995a. Evaluación de prácticas de conservación de suelos y aguas en cultivos hortícolas: Repollo y coliflor. *Alcance* (Maracay, Venezuela) 47:1-11.
- Fernández, N. 1995b. Evaluación de la eficiencia de sistemas de conservación en tres cultivos hortícolas durante dos ciclos y otras coberturas permanentes. *Alcance* (Maracay, Venezuela) 47:117-126.
- Fernández, N. 1995c. Efectos en las pérdidas de suelo y agua de diferentes tasas de residuos aplicados a un suelo sin cultivos en una cuenca alta. *Alcance* (Maracay, Venezuela) 47:107-116.
- Páez, M. L. 1995. Clasificación de suelos por riesgos de erosión hídrica con fines de planificación agrícola. *Alcance* (Maracay, Venezuela) 20:83-100.
- Páez, M. L. y Rodríguez P., O. S. 1984. El riesgo de erosión hídrica como criterio de diagnóstico en clasificación y evaluación de tierras. Trabajo presentado en el VIII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo celebrado en Maracay, Venezuela, noviembre 1984. Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo (SVCS). 12 p. (Multicopiado.)
- Páez, M. L. y Rodríguez P., O. S. 1989. Factores de la ecuación universal de pérdidas de suelo. *Alcance* (Maracay, Venezuela) 37: 21-31.
- Páez, M. L. y Rodríguez P., O. S. 1992. Erosion and conservation assessment on arable lands in Venezuela. En: Hurni, H. y Tato, K. (eds.). Erosion, conservation, and small scale farming. Trabajos escogidos de la Sixth International Soil Conservation Conference celebrada en Etiopía y Kenia, noviembre 1989. Walsworth Pub., Kansas, E. U. p. 39-49.
- Páez, M. L. y Rodríguez P., O. S. 1995. Eficiencia de diferentes sistemas en el control de la erosión. *Alcance* (Maracay, Venezuela) 47:13-28.

- Rodríguez P., O. S. 1997. Hedgerows and mulch as soil conservation measures evaluated under field simulated rainfall. *Soil Technol.* 11:79-93.
- Rodríguez P., O. S.; Lizaso, J.; y Páez, M. L. 1982. Evaluación preliminar de los factores de cobertura (C) y prácticas de conservación (P) en la ecuación universal de pérdidas de suelo. Trabajo presentado en el VII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo celebrado en San Cristóbal, Venezuela, noviembre 1982. 12 p. (Multicopiado.)
- Rodríguez P., O. S. y Fernández, N. 1992. Conservation practices for horticulture production in the mountainous regions of Venezuela. En: Hurni, H. y Tato, K. (eds.). *Erosion, conservation, and small scale farming.* Trabajos escogidos de la Sixth International Soil Conservation Conference celebrada en Etiopía y Kenia, noviembre 1989. Walsworth Pub., Kansas, E. U. p. 393-406.
- Rodríguez P., O. S.; Fernández, N.; y Fernández, A. 1995. Evaluación de la erosión en una secuencia zanahoria-lechuga con diferentes prácticas de manejo. *Alcance* (Maracay, Venezuela) 47:49-61.
- Rodríguez P., O. S. y Páez, M. L. 1986. El uso de coberturas como medio de protección contra la erosión del suelo. Trabajo presentado en el IV Congreso Venezolano de Conservación celebrado en Maracaibo, Venezuela, noviembre-diciembre 1986. 9 p. (Multicopiado.)
- Rodríguez P., O.S. y Rodríguez, O. E. 1989. Adaptación de un simulador de lluvia para investigación en conservación de suelos. *Alcance* (Maracay, Venezuela) 37:103-112.
- Syoufi, A. F. 1990. Evaluación de sistemas de conservación de cuencas altas; Parte I. (Tesis). Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay. 57 p.
- Urbina, C. y Rodríguez P., O. S. 1995. Evaluación de sistemas de conservación en tierras altas bajo cultivo de trigo. *Alcance* (Maracay, Venezuela) 47:75-87.
- Useche, R.; Méndez, J. A.; y Yáñez, P. 1986. Evaluación preliminar del factor "C" en la ecuación universal de pérdidas de suelos bajo diferentes prácticas de manejo, en el cultivo del café. Trabajo presentado en el IV Congreso Venezolano de Conservación celebrado en Maracaibo, Venezuela, noviembre-diciembre 1986. 11 p.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. *Agriculture Handbook No. 537.* United States Department of Agriculture (USDA), Washington, D.C., E. U.

## CAPÍTULO 5

# La Relación Erosión-Productividad en los Llanos Orientales de Colombia: Avances en la Investigación

Franco Humberto Obando\*

### Resumen

El ecosistema de sabanas de la Orinoquia constituye un importante potencial de tierras para la intensificación agropecuaria y la expansión de la frontera agrícola de Colombia. La tecnología existente (Leal, 1994), basada en la rotación y asociación de cultivos y en pastos y leguminosas forrajeras tolerantes de suelos ácidos, permitirá, según los cálculos, incrementar la productividad agropecuaria que hoy se obtiene en los 4 millones de hectáreas que comprenden la Altillanura plana a ligeramente ondulada y las terrazas altas del Piedemonte llanero.

Hay, sin embargo, factores que se oponen a que un uso más intenso de estas áreas sea sostenible, como la fuerte estacionalidad de las lluvias, la erodabilidad de los suelos, la ocurrencia de precipitaciones fuertemente erosivas, la vulnerabilidad de las propiedades físicas de los suelos, y la escasa fertilidad de éstos. Todos ellos amenazan la productividad a largo plazo de los agroecosistemas mencionados (Ortiz et al., 1994). La erosión hídrica,

por su parte, es una de las mayores limitantes del desarrollo agropecuario sostenible en los Llanos Orientales de Colombia. Las investigaciones preliminares de este autor demuestran que, efectivamente, los Oxisoles de las terrazas altas del Piedemonte llanero son muy vulnerables a la erosión hídrica laminar.

Ahora bien, es necesario cuantificar las relaciones entre erosión y productividad mediante investigaciones a escalas adecuadas de tiempo y de espacio y con sistemas apropiados de producción. El programa nacional de Manejo Integrado de Suelos y Aguas de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) se ha hecho cargo de esta iniciativa dentro del marco de una propuesta multinacional apoyada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Stocking, 1988; 1995).

En este trabajo se presentan algunos avances de la investigación sobre la relación erosión-productividad en los Llanos Orientales de Colombia, que ha generado el proyecto *Pérdidas de productividad inducidas por la erosión en los suelos de la Orinoquia*. Este proyecto es financiado por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (COLCIENCIAS) y por la FAO.

\* I.A., M.Sc., Profesor, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

## Introducción

Es bien conocido el hecho de que la erosión del suelo hace un impacto serio sobre la agricultura y la sostenibilidad de la producción agrícola. En realidad, este efecto fue el incentivo del modelo de investigación en erosión que inició el científico alemán E. Wollny entre 1877 y 1895 (Sanders, 1990) y que fue desarrollado en América del Norte a partir de 1920 (Stocking, 1988). El tema del impacto de la erosión sobre la productividad del suelo fue revivido en 1984 cuando el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos dio la más alta prioridad a la investigación hecha a largo plazo sobre la *relación erosión-productividad* (USDA, 1990). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), por su parte, fue comisionada para estudiar este problema en los países menos desarrollados (Stocking, 1988).

La conclusión general es que el conocimiento que se tiene tanto de la magnitud del impacto de la erosión como de las probables disminuciones de la productividad agrícola expuesta a ese impacto es aún imperfecto. Asimismo, buena parte de la investigación que se ha hecho sobre erosión, particularmente en los países tropicales, es incapaz de resolver las siguientes incógnitas (FAO, 1985; 1991):

¿Cómo varía el rendimiento de los cultivos con la erosión durante un tiempo largo?

¿Qué factores individuales y qué cambios de propiedades contribuyen más a la declinación de la productividad agrícola, causada por la erosión?

¿Esos factores comprenden variables como la pérdida de

nutrimentos, la reducción del volumen de enraizamiento, la pérdida de la capacidad de retención de agua, la acidificación o la toxicidad inducida por agentes químicos como aluminio o hierro?

¿Está empeorando el problema de la erosión o habrán alcanzado los sistemas de producción en los trópicos un nivel estable de baja productividad?

¿Puede la conservación de suelos detener la declinación de la productividad? ¿Con cuáles técnicas?

¿Están atacando las prácticas de conservación de suelos un problema erróneo? ¿Deberían dedicarse más a mejorar la calidad y la productividad del suelo remanente y menos a tratar de controlar las pérdidas de suelo?

En general, la investigación que se hace tradicionalmente sobre erosión no puede suplir los datos necesarios para tomar decisiones económicas y sociales, y para proceder a la planeación de una agricultura sostenible.

La FAO ha reconocido la amenaza del proceso de degradación de las tierras, que es potencialmente más rápida en los países tropicales (FAO, 1991). La FAO reconoce también que las sabanas tropicales dominadas por Ultisoles y Oxisoles representan el principal recurso de suelo subutilizado en los trópicos ecuatoriales. Una pregunta importante es si estos ecosistemas de sabana pueden sostener —y hasta qué punto— una agricultura intensiva. Es urgente, por ello, la *necesidad de información* sobre las relaciones entre la erosión y el rendimiento para estas zonas agroecológicas.

En consecuencia, la División de Desarrollo de Aguas y Tierras de la FAO ha tomado la iniciativa de



organizar una red internacional de investigación para cuantificar el impacto de la principal forma de degradación de los suelos tropicales: la *erosión hídrica laminar*. En América del Sur, seis países, incluyendo a Colombia, y ocho grupos de investigación han respondido al llamado de la FAO (Stocking, 1995; Tenberg et al., 1996).

## Objetivos en Colombia

El *objetivo general* es investigar el impacto de la erosión hídrica en la productividad del suelo en el ecosistema de sabanas de la Orinoquia.

Los *objetivos específicos* están contenidos en la solución de las siguientes incógnitas:

- ¿Qué cambios experimenta la productividad del suelo de las terrazas altas del Piedemonte llanero a medida que se intensifica en él la agricultura y se incrementa la erosión?
- ¿Cuál es la variable física, química o biológica que interviene en los procesos subyacentes al fenómeno de una productividad agrícola que declina al tiempo que la erosión progresa?
- ¿Es posible extrapolar resultados a condiciones agroecológicas similares (por ejemplo, la Altillanura plana) empleando modelos matemáticos y métodos apropiados, en el mínimo tiempo posible y sin elaborar excesivamente los procesos experimentales?
- ¿Cómo se cuantificaría el costo o el impacto económico de la erosión?

La Figura 1 ilustra el proceso de investigación y los resultados esperados.

## Materiales y Métodos

### *Diseño experimental*

El procedimiento recomendado por la FAO (1985) comprende 27 parcelas de pérdida de suelo y escorrentía de aproximadamente 50 m<sup>2</sup>. Se propone aquí un diseño de tres bloques con tratamientos distribuidos al azar en los que haya cuatro niveles de erosión natural (o sea, con pérdida de suelo causada por agua de lluvia natural), cuatro niveles de erosión artificial (o sea, con remoción mecánica de la capa superficial de las parcelas), y varios niveles de erosión en que se dé un manejo convencional al suelo (tratamientos testigo). Las parcelas experimentales se definen según el tipo de erosión, así:

- *Parcelas N*: las de erosión causada por lluvias naturales, desprovistas de vegetación; los cuatro niveles de erosión se producen cubriendo las parcelas con mallas de plástico de diferentes grados de cobertura o sombra, a 40 cm sobre la superficie del suelo.
- *Parcelas A*: las de erosión por remoción artificial; el suelo se remueve artificialmente hasta lograr cuatro niveles de 'erosión', con el fin de obtener el rango de respuestas de rendimientos que se espera en las parcelas N.
- *Parcelas C*: las parcelas testigo, en que el manejo de suelos es convencional y hay sistemas de rotación de cultivos anuales y pasturas.

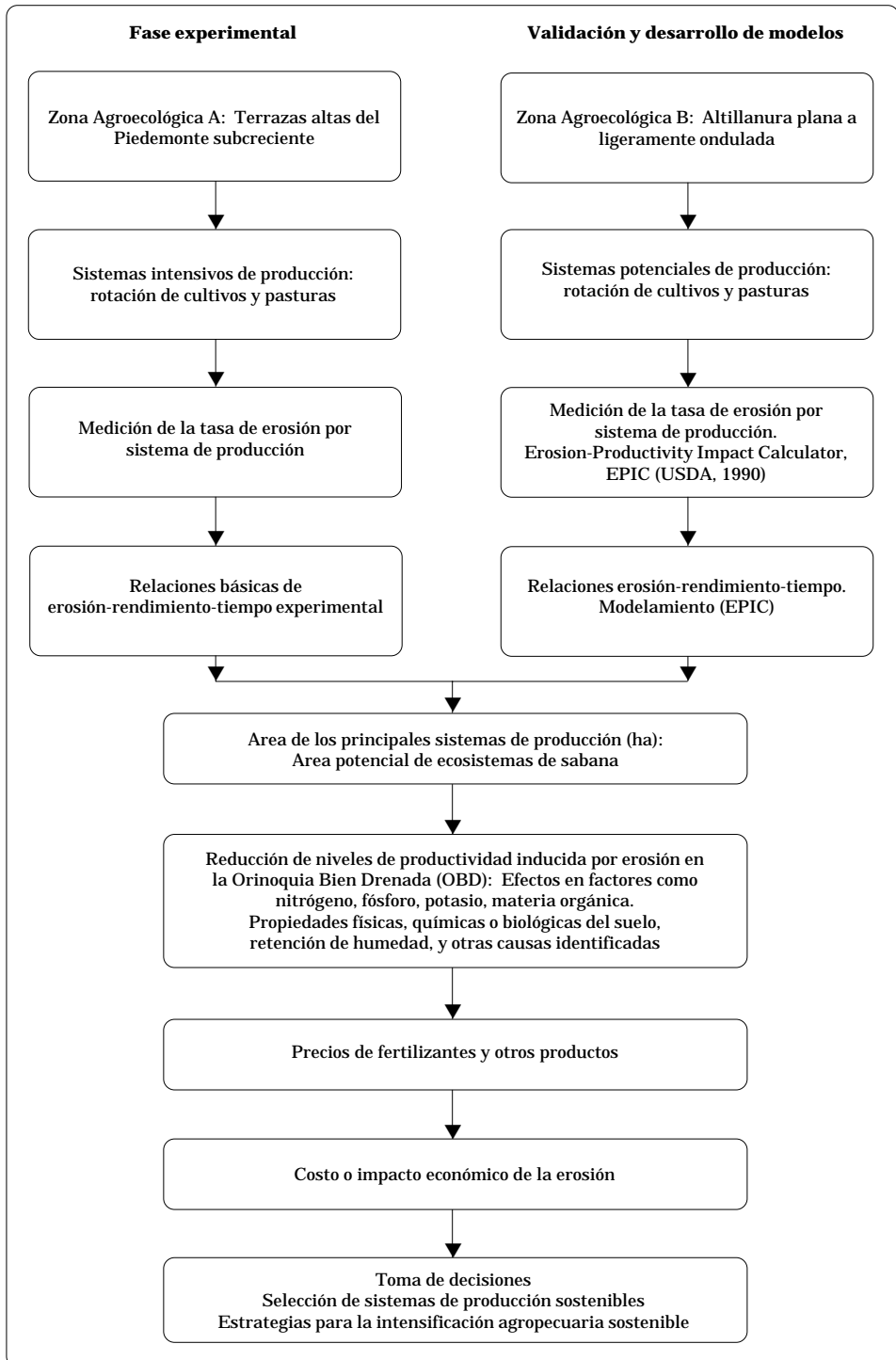


Figura 1. Diagrama de flujo que ilustra el cálculo de la pérdida de productividad y el costo de la erosión para la Orinoquia Bien Drenada (OBD).

El diseño de la FAO sugiere o permite modificaciones según las condiciones locales; en el Centro de Investigaciones La Libertad, de CORPOICA, se instalaron 36 parcelas de pérdida de suelo siguiendo las recomendaciones de Da Veiga y Do Prado (1993). El Cuadro 1 presenta los tratamientos y la remoción de suelo esperada.

### **Suelo experimental**

Este suelo se ha clasificado tradicionalmente como un Tropeptic Haplorthox. Según la taxonomía actual, corresponde, a nivel de suborden, a un Udox de las terrazas altas del Piedemonte subreciente, con una pendiente media del 4%. El manejo antecedente fue de pasturas mejoradas de braquiaria (*Brachiaria decumbens*) durante más de 30 años.

El diagnóstico de limitantes físicas del suelo no reveló signos de compactación severa por sobrepastoreo ni erosión por pérdida de cobertura vegetal, resultado que ofrecía una condición inicial del suelo adecuada para los objetivos experimentales.

### **Procedimientos, cultivos y evaluación**

Las parcelas N permanecen con el suelo descubierto durante 3 ó 4 años; todas las parcelas parten, por tanto, de una condición común. Al final del período establecido, habrán sufrido grados diferentes de erosión y se espera que éstos afecten diferencialmente la productividad del suelo. Una vez alcanzados los niveles de erosión natural y pasados de 3 a 4 años, se removerá el suelo de las parcelas de erosión artificial (parcelas A) raspando

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos con que se obtienen diferentes niveles de pérdida o remoción de suelo.

Clase de erosión	Tratamiento no.	Niveles de erosión o pérdida de suelo por remoción	Tratamientos para obtener niveles de pérdida o remoción de suelo	Pérdida o remoción esperada <sup>a</sup> (Mg/ha)
Lluvia natural (parcelas N)	T1	N1 (muy severa)	Suelo descubierto	150
	T2	N2 (severa)	Cobertura con malla 33%	100
	T3	N3 (moderada)	Cobertura con malla 45%	50
	T4	N4 (ligera)	Dos mallas superpuestas: 33% + 45%	25
	T5	N5 (muy ligera)	Pasto Braquiaria	10
	T6	N6 (testigo o control)	Cultivos anuales: arroz-soya, pastos	40
Remoción artificial (parcelas A)	T7	A1 (muy severa)	Remoción: 5 cm	600
	T8	A2 (severa)	Remoción: 2.5 cm	300
	T9	A3 (moderada)	Remoción: 1.25 cm	150
	T10	A4 (ligera)	Remoción: 0.5 cm	75
	T11	A5 (muy ligera)	Remoción: 0.25 cm	40
	T12	A6 (natural)	Remoción: << 0.25 cm	<< 20

a. Mg = megagramo, que equivale a 1 t (1 tonelada métrica).

de su superficie capas de espesor determinado según las indicaciones dadas en el Cuadro 1. El objetivo es obtener un rango de respuestas de rendimiento similar al producido en las parcelas N.

Todas las parcelas serán cultivadas a partir del año 3 ó 4 durante 2 años, tiempo durante el cual se hará un seguimiento del crecimiento de las plantas y simultáneamente de los cambios físicos, químicos y biológicos del suelo. Las tres parcelas C (testigo) se cultivan desde el año 1. Para estas parcelas se seleccionó un sistema de rotación de los cultivos arroz seco y soya, usando variedades que toleran los suelos ácidos (Leal, 1994). Se establecerá, finalmente, el sistema arroz-pastos recomendado como práctica previa a la introducción de las pasturas mejoradas. También se evaluará el efecto de la erosión en la productividad de los pastos.

La metodología de evaluación y el seguimiento experimental propuesto por FAO (1985) ofrecen un menú de medidas del suelo, del clima y de los cultivos. Los análisis de suelos incluyen las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que sean relevantes. Las medidas del clima comprenden la cantidad diaria de lluvia, la intensidad de la lluvia, y los parámetros para el cálculo de la energía y la erosividad; otros parámetros meteorológicos se registran en la estación meteorológica del Centro Nacional de Investigación La Libertad de CORPOICA.

Las parcelas en que se medía la pérdida de suelo y la escorrentía terminaron de instalarse en diciembre de 1995. Los tratamientos T1, T5 y T6, junto con nueve parcelas ya existentes para este trabajo, se emplearon para determinar la erodabilidad del suelo (K) e investigar la vulnerabilidad del suelo a la erosión (Umaña y Astroz, 1997). La instalación de las mallas

para hacer sombra (tratamientos T2, T3, T4) terminó en junio de 1996 porque fue difícil conseguir los materiales adecuados en el mercado local. Por consiguiente, el registro de los datos obtenidos en estos tratamientos de cobertura artificial empezó en julio de 1996.

## Resultados

El Cuadro 2 presenta la pérdida promedio acumulada de suelo de cada tratamiento durante el período de enero a diciembre de 1996.

El Cuadro 3 presenta, como uno de los primeros resultados de este ensayo,

Cuadro 2. Pérdida de suelo, en promedio, acumulada durante el período enero-diciembre de 1996.

Tratamiento	Pérdida de suelo (kg/m <sup>2</sup> )
T1 (suelo descubierto)	10.9950 <sup>a</sup>
T2 (malla de 33% para sombra)	0.5365
T3 (malla de 45% para sombra)	0.5652
T4 (malla de 33% y 45%)	0.5279
T5 (pasto Braquiaria)	0.6640 <sup>a</sup>
T6 (testigo)	-4.4550 <sup>a</sup>

a. Datos de Umaña y Astroz (1997).

Cuadro 3. Pérdida de suelo, en promedio, en los tratamientos con malla de sombra o de cobertura durante el período julio-diciembre de 1996.<sup>a</sup>

Tratamiento	Pérdida media de suelo (kg/m <sup>2</sup> )
Malla de 45% para sombra	0.178 a
Malla de 33% para sombra	0.158 ab
Malla de 33% + 45%	0.138 b

a. Valores medios seguidos de la misma letra no son estadísticamente diferentes al 5%.

los promedios de pérdida de suelo en los tratamientos en que se instalaron mallas de 'sombra' o de cobertura.

## Discusión y Conclusiones

- Respecto a las *pérdidas anuales acumuladas*, no hubo diferencias significativas en los tratamientos en que se usó la cobertura artificial, lo que confirma la relación no lineal entre el porcentaje de lluvia interceptada por la cobertura (la vegetal) y la pérdida de suelo (Hudson, 1993). Esta relación fue encontrada también por S. C. F. Dechen (1996, comunicación personal), quien sugería el uso de mallas de 33%, 18% y porcentajes intermedios para obtener las tasas de erosión esperadas.
- Es interesante observar que las tasas de pérdida de suelo en parcelas con pasto braquiaria (T5) tampoco presentan diferencias significativas aparentes cuando se las compara con las obtenidas en los tratamientos de cobertura artificial.
- Los resultados obtenidos en 1966 y los datos registrados en 1997 indicarán la decisión más acertada respecto a los porcentajes de sombra que se deben emplear en el futuro para producir niveles de erosión que contrasten entre sí. Las franjas con malla de diferente calibre para hacer sombra, intercaladas con franjas de suelo descubierto (sin malla), serán una opción que se evaluará a partir del segundo semestre de 1997. El propósito es, obviamente, simular un sistema de cultivos en forma más realista. Se aplicarán porcentajes de sombra menores que 33% porque se supone que las franjas cubiertas con malla para

cobertura de 33% o de 45% —o con estas dos superpuestas— hacen una cobertura cuyos efectos son similares a los que causa el pasto braquiaria.

- Los datos de pérdida anual de suelo en parcelas descubiertas registrados por Umaña y Astroz (1997), junto con la erosividad de las lluvias, confirman la alta erodabilidad de los Oxisoles del Piedemonte llanero.

Los resultados que tienen que ver con pérdida de nutrimentos y con cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo se encuentran en proceso.

## Referencias

- Da Veiga, M. y Do Prado, W. 1993. Manual para la instalación y conducción de experimentos de pérdida de suelo. Documento de Campo 1. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Santiago de Chile. [Proyecto GCP/RLA/107/JPN.]
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1985. Erosion-induced loss in soil productivity: A research design. Consultants' working paper no. 2. Soil Conservation Programme. Roma.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1991. Network in erosion-induced loss in soil productivity. Trabajo presentado en un taller celebrado en Bogor, Indonesia, marzo de 1991. Soil Resources Management and Conservation Service, Land and Water Development Division. Roma.
- Hudson, N. W. 1993. Field measurement of soil erosion and runoff. Soils Bulletin 68. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma.

- Leal, M. D. 1994. Sistemas de producción agrícola actuales y potenciales en la Orinoquia. Memorias del seminario Manejo Sostenible del Recurso Suelo en la Orinoquia Colombiana celebrado en Villavicencio, Colombia, agosto de 1994. Instituto de Investigaciones de la Orinoquia Colombiana, Universidad de los Llanos, Villavicencio (Meta), Colombia.
- Ortiz, Q. R.; Etter, A.; Obando, F. H.; y Gómez, P. 1994. Estrategias para el uso de la tierra en las sabanas bajas de América del Sur: Colombia. Trabajo presentado en un taller. CIAT, Cali, Colombia.
- Sanders, D. W. 1990. New strategies for soil conservation. *J. Soil Water Conserv.* 45(5):511-516.
- Stocking, M. 1984. Erosion and soil productivity: A review. Consultants' working paper no. 1. Soil Conservation Programme, Land and Water Development Division, FAO, Roma.
- Stocking, M. 1988. Networking the impact of erosion. *Soil Technol.* 1:289-292.
- Stocking, M. 1995. Erosion/productivity research in South America. Consultants' working paper no. 4. Land and Water Development Division, FAO, Roma.
- Tenberg, A.; Stocking, M.; y Dechen, S. C. F. 1996. Soil erosion and crop productivity research in South America. Trabajo presentado en Ninth Conference of International Soil Conservation Organization celebrada en Bonn, Alemania, agosto 1996.
- Umaña, A. y Astroz, J. 1997. Erodabilidad y vulnerabilidad a la erosión hídrica de un oxisol del Piedemonte llanero. Tesis. Facultad de Agronomía, Universidad de los Llanos, Villavicencio (Meta), Colombia.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1990. EPIC: Erosion/Productivity Impact Calculator 1: Model Documentation. Technical Bulletin no. 1768.

## CAPÍTULO 6

# Propuesta de una Nueva Clasificación de Suelos en una Región del Valle del Río Cauca<sup>1</sup>

*Alvaro García O., Julián Borrero S. y Carlos A. Gómez.\**

### Resumen

La diferente intensidad con que han actuado los factores formadores del suelo en las diversas áreas fisiográficas que constituyen el valle del río Cauca da origen, en este valle, a una gran variabilidad en los suelos. Existe, por ello, una extensión considerable de suelos que presenta una alta saturación de  $Mg^{2+}$  en el complejo de cambio y que es reportada en los estudios de suelos como 'suelos con relación Ca:Mg invertida'. El sistema básico de clasificación de suelos (conocido como Soil Taxonomy) considera que los suelos afectados por  $Na^+$  y los afectados por  $Mg^{2+}$  pertenecen a un mismo grupo, ya que poseen un horizonte nátrico con todas las propiedades de un horizonte argílico, con más  $Mg^{2+}$  y  $Na^+$  intercambiables que [Ca<sup>2+</sup> más acidez intercambiable (pH = 8.2)] en algunos horizontes dentro de los 40 cm del límite superior —si la RAS (relación de absorción de sodio) es mayor que 13 o si el PSI (porcentaje de saturación de Na

intercambiable) es mayor que 15 en algún horizonte a menos de 2 m de la superficie. Se incluye al  $Mg^{2+}$  en la definición del horizonte nátrico porque, a medida que el  $Na^+$  es removido, el  $Mg^{2+}$  lo sigue en la secuencia de lavado, a condición de que los cloruros sean pocos y los sulfatos abundantes. Si el lavado continúa, el  $Mg^{2+}$  llega a ser, a veces, remplazado. La literatura europea considera este tipo de suelos como una categoría especial de suelo salino que puede tener una génesis distinta y diferentes propiedades.

El análisis de los resultados de laboratorio de más de 24,000 muestras de suelos y de aproximadamente 2200 perfiles, ubicados en sus diferentes posiciones fisiográficas, permitió evaluar la situación del  $Mg^{2+}$  en los suelos del valle del río Cauca. El estudio y la agrupación de los perfiles seleccionados condujo a la identificación de cinco perfiles magnésicos principales (y de algunos tipos o variantes en cada perfil) que predominan en las diferentes unidades del paisaje.

Considerando la extensión del área afectada (116,860 ha) y de la dominancia aparente del  $Mg^{2+}$  sobre el  $Na^+$ , se confirma el hecho de que, en algunos suelos, el  $Mg^{2+}$  tiene la capacidad de desarrollar mayores niveles de  $Na^+$  intercambiable en los suelos.

1. Contribución de la UNAL-sede Palmira y de la CVC.

\* I.A., Ph.D., Director General, Escuela de Posgrados, UNAL-Sede Palmira; I.A., Profesor, UNAL-Sede Palmira; e I.A., M.Sc., CVC, Palmira, respectivamente.

## Introducción

La acumulación de  $Mg^{2+}$  en el complejo de cambio de algunos suelos ocurre cuando se dan ciertas condiciones, por ejemplo:

- *Riego* con aguas que contengan una alta concentración de  $Mg^{2+}$  intercambiable o presencia de capas freáticas ricas en este catión.
- Naturaleza del *material* que dio origen al suelo, como la serpentina y otros materiales magnésicos; son comunes, por tanto, en el delta del río Sacramento (California, E. U.), en regiones de Hungría, Bulgaria y Rusia, en el delta del río Nilo, y en el valle del río Cauca (Colombia).

El  $Mg^{2+}$  afecta las propiedades del suelo de diverso modo:

- Ejerce un efecto floculante (similar al del  $Ca^{2+}$ ) que mantiene la estructura del suelo y permite su desarrollo, afirman unos.
- Reduce el crecimiento de las plantas por su efecto tóxico específico (directamente) y porque deteriora las propiedades físicas del suelo (indirectamente), según otros; este último efecto consiste en la pérdida de propiedades de conducción del agua (infiltración, conductividad hidráulica, permeabilidad) ya que promueve (el  $Mg^{2+}$ ) la dispersión y la expansión de las arcillas. El grado de dispersión aumenta al incrementarse la relación Mg:Ca en la solución del suelo. En la literatura se reportan diversas opiniones sobre el efecto del  $Mg^{2+}$  en la fertilidad de los suelos (Alperovitch et al., 1981; Antipov-Karataev y Mamaeva, 1958; Girdhar y Yadav, 1981; Rahman y Rowell, 1979).

- Puede ayudar a elevar el nivel del  $Na^+$  intercambiable en las arcillas y en el suelo, sugieren otros investigadores.

Los *suelos magnésicos* serían una categoría especial de los suelos salinos, que se caracteriza por presentar altas saturaciones de magnesio en el complejo de cambio (García, 1988). Una revisión cuidadosa de la literatura destaca el hecho de que los suelos magnésicos de diversa génesis, y de propiedades diferentes, se han estado considerando como un solo grupo y no se han tenido en cuenta sus procesos de formación, sus fuentes de Mg, su forma de enriquecimiento magnésico, y el tipo y la movilidad de los compuestos de magnesio acumulados en ellos. Según el mismo investigador (García, 1988), el término 'suelos magnésicos' incluye los siguientes tipos de suelos:

- Los suelos donde el Mg se acumula en forma de sales inorgánicas (principalmente sulfato de magnesio y cloruro de magnesio) y se conocen como *Solonchak* (Kovda et al., 1967). La alta concentración de sales de magnesio en la solución del suelo es tóxica para las plantas y causa en ellas un efecto fisiológico directo.
- Los suelos de color oscuro y textura pesada, con altas cantidades de  $Mg^{2+}$  (intercambiable y total), baja conductividad hidráulica y limitada movilidad de la humedad en el suelo, conocidos como *hidromórficos* (Darab y Remenyi, 1978; Emerson y Smith, 1970). Algunos autores relacionan sus deficientes propiedades hídricas con el incremento en el grado de saturación de  $Mg^{2+}$  (Ovcharenko et al., 1974) y otros mencionan que en ellos se forman complejos [Mg-suelo-materia orgánica] de alta estabilidad, los cuales, junto con las capas silicatadas de la fracción arcillosa, forman



compuestos de gran hidratabilidad (Emerson y Smith, 1970). Hay relación entre el aumento en la cantidad de capas silicatadas expandibles y la inhibición del movimiento del agua en estos suelos.

- El grupo de suelos que presenta una alta saturación de  $Mg^{2+}$  acompañada de una amplia variación en la saturación de  $Na^+$  y de todas las características morfológicas del *perfil Solonetz*. Algunos autores resaltan la similitud del comportamiento de los iones  $Mg^{2+}$  y  $Na^+$  en la formación Solonetz (Máté, 1935).

El aumento en la saturación de  $Mg^{2+}$  parece ser el primer estadio en el proceso de formación de los Solonetz. Se ha probado (Antipov-Karataev y Filipova, 1955; Antipov-Karataev y Mamaeva, 1958; Arany, 1931) que la morfología de los suelos Solonetz que tengan un alto grado de saturación de  $Mg^{2+}$  y un bajo grado de saturación de  $Na^+$  es el rezago de un estado anterior en la formación de dichos suelos —asociado con el enriquecimiento de  $Na^+$  intercambiable— que puede influir en su fertilidad.

La formación y la acumulación de compuestos magnésicos se debe a un gran número de procesos geoquímicos de formación del suelo, que tienen lugar en el estrato superior de la corteza terrestre.

## Suelos del Valle del Cauca

La variación que se observa en los suelos del valle del río Cauca se debe a la diferente intensidad de los factores formadores del suelo que actúan en las diversas áreas fisiográficas en que dicho valle puede dividirse. Un conjunto considerable de esos suelos, que presentan una alta saturación de

$Mg^{2+}$  en el complejo de cambio, suelen reportarse como suelos cuya relación Ca:Mg es estrecha o invertida (García, 1988). En la región del departamento del Valle hay más de 30,000 ha de estos suelos y no se han contabilizado aún los que existen en la Costa Atlántica. La carencia de información sobre los procesos que conducen a la formación de este tipo de suelos, la magnitud del área implicada, el grado en que ésta ha sido afectada y, especialmente, el desconocimiento tanto de parámetros seguros para evaluar cada condición de estos suelos como de prácticas más adecuadas para manejarlos justifican un programa de investigación sobre los suelos magnésicos. Dicho programa incluiría el efecto del catión dominante  $Mg^{2+}$  en el complejo de cambio y el efecto de los compuestos móviles en las propiedades de los suelos y en el crecimiento de las plantas.

El resultado de este trabajo será un manejo del recurso suelo que garantice su productividad adecuada y permanente en la región considerada. Esta iniciativa es de vital importancia para el desarrollo regional porque permitirá establecer, más adelante, un plan integral de recuperación y manejo de tierras que aportará mucho a la actividad agropecuaria de la región.

## Objetivos del Estudio

El objetivo principal de esta investigación fue identificar y cuantificar, mediante los datos del análisis de suelos realizado por diversos laboratorios ubicados en la zona estudiada, las áreas del valle del río Cauca que presentan una alta saturación de  $Mg^{2+}$ .

Se perseguían, además, tres objetivos específicos:

- contribuir al conocimiento de los efectos del  $Mg^{2+}$  intercambiable en las propiedades (físicas y químicas) de los suelos del valle del río Cauca;
- catalogar los suelos afectados según su posición geográfica y el tipo de afección que tengan;
- cuantificar las áreas del valle que presenten una saturación crítica de  $Mg^{2+}$  intercambiable.

## Metodología

Se revisaron los resultados de los análisis de suelos practicados en las 92,000 muestras tomadas entre 0 y 30 cm de profundidad por agricultores, auxiliares técnicos, y expertos de entidades públicas y privadas, quienes las enviaron a diversos laboratorios de suelos y aguas del departamento del Valle (ICA, Ingenio Providencia, Ingenio Mayagüez, IGAC) en un lapso un poco mayor de 10 años (1985-1996). Para evitar incongruencias, se descartaron los resultados cuyos datos estaban incompletos o no ofrecían seguridad sobre la profundidad a la que se tomó la muestra o sobre la identificación de ésta. Se seleccionaron así 24,000 resultados que se clasificaron según dos criterios:

- Los rangos de concentración (en meq/100 g) de  $Mg^{2+}$  intercambiable: < 6.0; 6.1 a 12; 12.1 a 18.0; 18.1 a 24 y > 24.1.
- El porcentaje de saturación de  $Mg^{2+}$  intercambiable: < 10, 11 a 20, 21 a 30, 31 a 40, 41 a 50 y > 51.

### Localización cartográfica

Partiendo de la información proporcionada por el análisis de 1616 perfiles, descritos por la CVC y ubicados en los mapas cartográficos del valle del río Cauca, y consultando los

resultados analíticos de los archivos históricos, se agruparon en el paisaje las muestras de suelos por municipios y según su posición fisiográfica. Se determinaron luego las áreas afectadas y se diferenciaron en ellas varios tipos de afección según el contenido de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Na^{+}$  (perfil magnésico-sódico), a medida que se profundizaba en el perfil.

### Análisis estadístico

Los resultados del análisis de todas las muestras de suelos se sometieron a un *análisis de frecuencia* que tomó, como parámetros, los rangos de saturación de  $Mg^{2+}$  intercambiable (PMgI) y los rangos de concentración de  $Mg^{2+}$  intercambiable usados en el estudio. Este análisis tiene dos objetivos:

- Observar la distribución de las áreas afectadas por  $Mg^{2+}$  según los parámetros establecidos.
- Cuantificar luego esas áreas (ver p. 92) por referencia a dos valores:
  - un PMgI crítico (saturación crítica de  $Mg^{2+}$ ) superior al estándar europeo (o sea, más del 40% de la CIC), y
  - un contenido alto de  $Mg^{2+}$  (o sea, > 6 meq/100 g de suelo).

### Cuantificación del área afectada

La información analítica obtenida de 52 perfiles modales (y de los 1616 perfiles existentes en los laboratorios del IGAC y de la CVC) y los mapas de distribución predial existentes permitieron cuantificar, en primera aproximación, el área afectada por el  $Mg^{2+}$ . Se consideró prioritaria la investigación del suelo superficial pero se tuvieron en cuenta la concentración de  $Mg^{2+}$  y la saturación de bases en el subsuelo.

Se determinó luego el tipo de afección del área cuantificada según los siguientes aspectos: grado de saturación de  $Mg^{2+}$  en el complejo de cambio, posición fisiográfica, características 'solonéticas' del perfil del suelo, y transectos longitudinales y transversales del valle del río Cauca.

Se estableció también la composición mineralógica de los suelos para poder evaluar la relación existente entre mineralogía y propiedades del suelo.

### Resultados y Discusión

El estudio y la agrupación de los perfiles seleccionados sirvió para identificar varios tipos de suelos característicos, que predominan en las diferentes unidades del paisaje estudiado.

#### Perfiles

Existen suelos considerados *normales*, en los cuales el contenido de  $Ca^{2+}$  es mayor que el de  $Mg^{2+}$  y éste, a su vez, mayor que el de  $Na^+$  (perfil 1); en algunos casos, las concentraciones de estos iones son muy altas (perfil 1A). La Figura 1 presenta esquemáticamente estos perfiles.

El perfil 2 corresponde a suelos con concentraciones muy elevadas de  $Ca^{2+}$  y concentraciones bajas de  $Mg^{2+}$ ; las de  $Na^+$  aumentan con la profundidad. A veces, la saturación del  $Mg^{2+}$  respecto a la CIC es superior al 50% (perfil 2A). Estos tipos de perfiles se aprecian en la Figura 2.

El perfil 3 presenta contenidos muy altos de  $Ca^{2+}$  y de  $Mg^{2+}$  y contenidos bajos de  $Na^+$ . En algún punto del perfil la concentración de  $Mg^{2+}$  se hace mayor que la de  $Ca^{2+}$  (Figura 3). En el perfil 3A, el contenido de  $Na^+$  es alto, aunque no supera al de  $Ca^{2+}$  o al de  $Mg^{2+}$  (Figura 4); en el perfil 3B, la

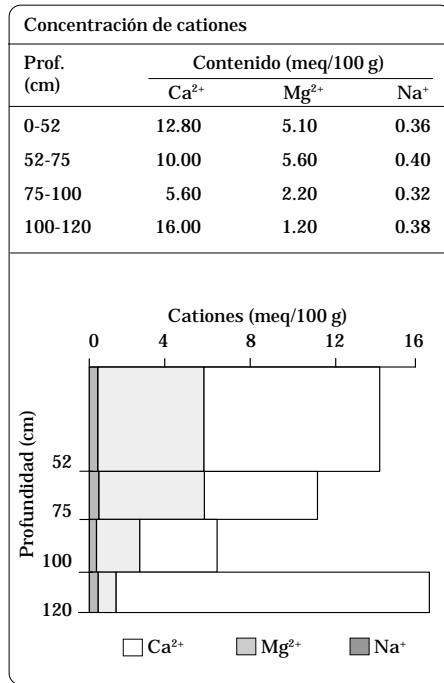


Figura 1. Perfiles 1 y 1A (concentración de cationes y gráfica) típicos de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. El perfil 1A es similar pero con mayores concentraciones de los iones. (Palmira, FG-1.)

concentración muy alta de  $Na^+$  supera las de  $Ca^{2+}$ , las de  $Mg^{2+}$  o las de  $Ca^{2+} + Mg^{2+}$  (Figura 5).

Hay suelos en que el  $Ca^{2+}$  y el  $Mg^{2+}$  presentan concentraciones similares en todo el perfil, sin que se aprecie una dominancia de alguno de los dos.

En el perfil 4 (Figura 6), el  $Na^+$  no constituye una limitante para la agricultura; lo es, en cambio, en el perfil 4A en que la concentración de  $Na^+$  crece a medida que se profundiza en el suelo (Figura 7).

En todo el perfil 5, las concentraciones de  $Mg^{2+}$  son mayores que las de  $Ca^{2+}$  sin que se observen concentraciones altas de  $Na^+$  (Figura 8). En el perfil 5A, el  $Na^+$  alcanza valores elevados que no

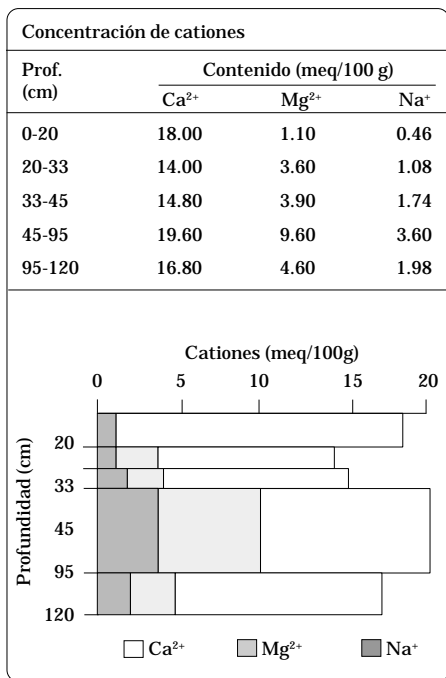


Figura 2. Perfiles 2 y 2A (concentración de cationes y gráfica) típicos de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. El perfil 2A es similar pero con sat. Mg > 50% (respecto a CIC). (Palmira, FG-98.)

superan los del Ca<sup>2+</sup> o los del Mg<sup>2+</sup> (Figura 9); en el perfil 5B, en cambio, supera los valores de estos últimos (Figura 10). En ocasiones (perfil 5C), la concentración de Na<sup>+</sup> sobrepasa, en general, la del Ca<sup>2+</sup> pero no la del Mg<sup>2+</sup> (Figura 11).

### Presencia del Mg<sup>2+</sup>

Una fracción considerable de los suelos del valle del río Cauca está afectada, en mayor o menor grado, por el Mg<sup>2+</sup> intercambiable. De 24,000 muestras de suelos de diverso origen antes mencionadas, el 15.1% presentó una saturación de Mg<sup>2+</sup> (respecto a la CIC) superior al 40%. Se calculó que el área total afectada por el Mg<sup>2+</sup> era de 116,860 ha, de un total de 198,875 ha estudiadas.

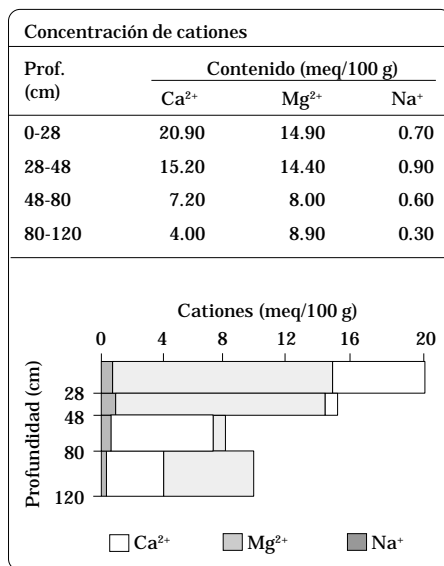


Figura 3. Perfil 3 (concentración de cationes y gráfica) típico de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. (Palmira, FG-496.)

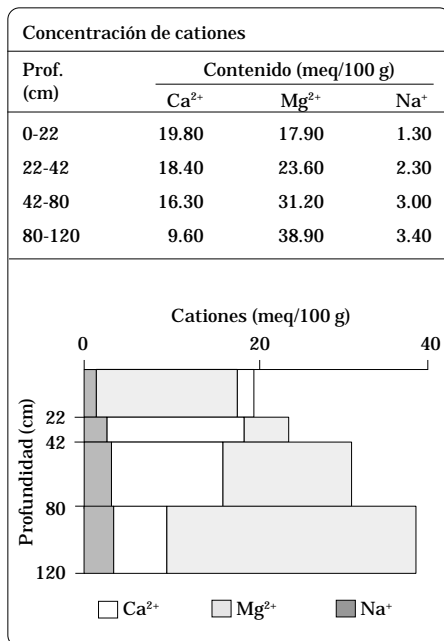


Figura 4. Perfil 3A (concentración de cationes y gráfica) típico de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. (Palmira, FG-797.)

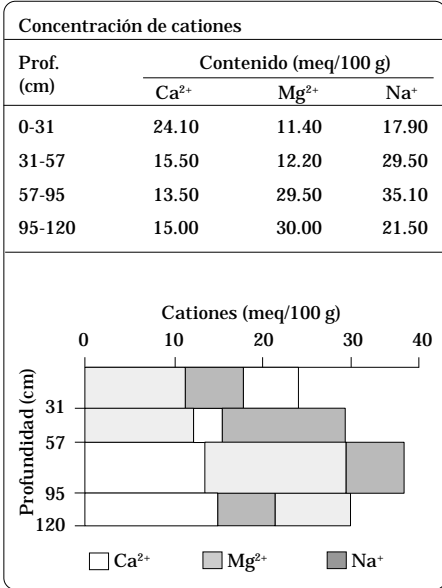


Figura 5. Perfil 3B (concentración de cationes y gráfica) típico de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. (Palmira, FG-205.)

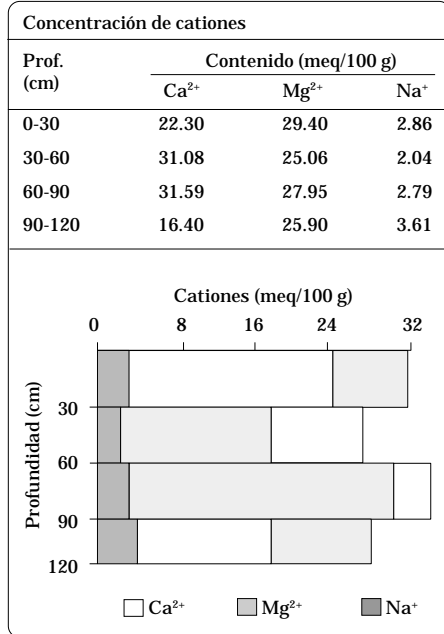


Figura 7. Perfil 4A (concentración de cationes y gráfica) típico de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. (Palmira, FG-1193.)

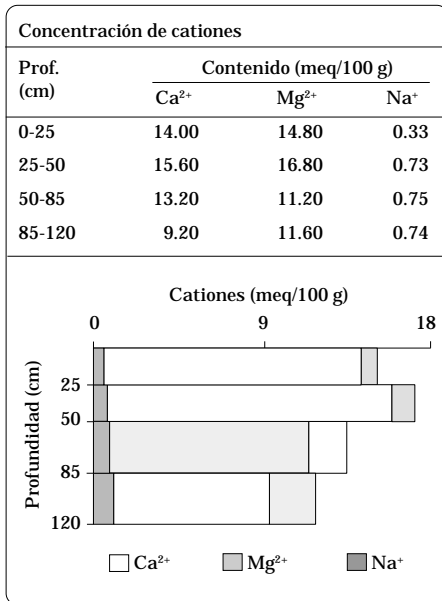


Figura 6. Perfil 4 (concentración de cationes y gráfica) típico de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. (Palmira, FG-1926.)

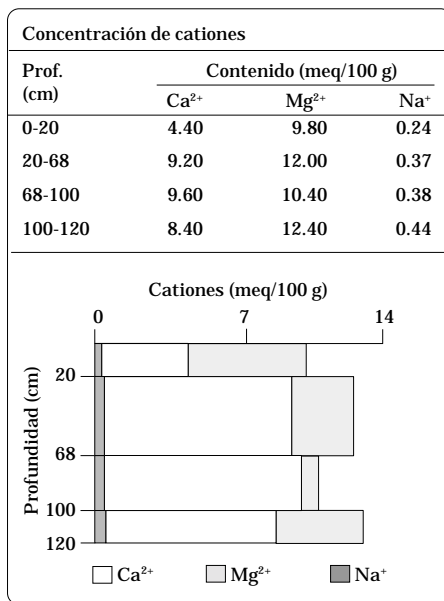


Figura 8. Perfil 5 (concentración de cationes y gráfica) típico de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. (Palmira, FG-2018.)

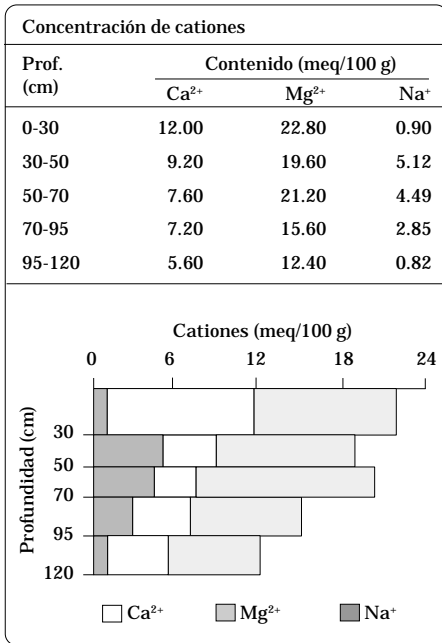


Figura 9. Perfil 5A (concentración de cationes y gráfica) típico de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. (Palmira, FG-1484.)

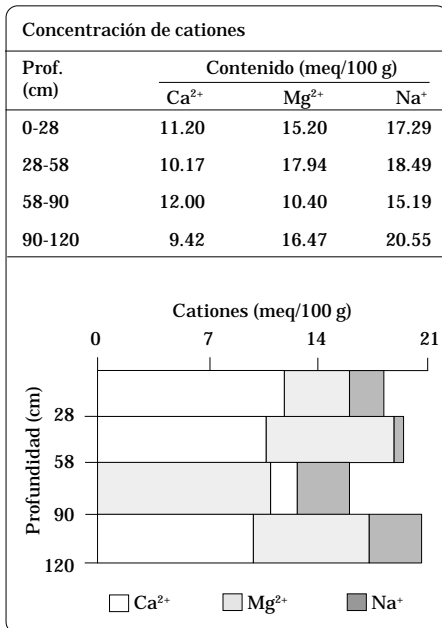


Figura 10. Perfil 5B (concentración de cationes y gráfica) típico de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. (Palmira, FG-1852.)

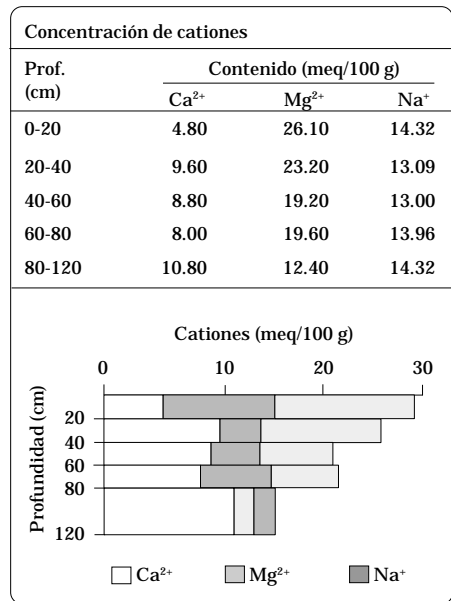


Figura 11. Perfil 5C (concentración de cationes y gráfica) típico de los suelos magnésicos del valle del río Cauca. (Palmira, FG-1830.)

Los tipos de perfil hallados en estos suelos se relacionan con el paisaje (Cuadro 1). En la planicie aluvial del río Cauca, en la planicie aluvial del piedemonte y en la planicie fluvioacustre predominan los tipos de perfil en que el Mg<sup>2+</sup> aumenta con la profundidad y supera (parcial o totalmente) al Ca<sup>2+</sup>; además, el Na<sup>+</sup> se acumula en el perfil siguiendo tendencias similares a las del Mg<sup>2+</sup>. Se cree, por tanto, que en las unidades de esta posición geográfica el Mg<sup>2+</sup> favorece, de algún modo, la acumulación de Na<sup>+</sup> en el suelo.

### Taxonomía

El sistema básico de clasificación de suelos, conocido como Soil Taxonomy (USDA, 1975), tiene alguna dificultad en su aplicación a los suelos magnésicos, especialmente a aquellos en que no hay presencia de Na<sup>+</sup> y que no dan pie a la denominación de

Cuadro 1. Area afectada por  $Mg^{2+}$  y su relación con formas generales del paisaje, en el valle del río Cauca, en Colombia.

Forma general del paisaje	Area afectada (ha)	Perfil predominante del suelo	Total área muestreada (ha)
Planicie aluvial del río Cauca	24,597	3, 5	35,511
Planicie aluvial del piedemonte	79,440	3, 5	141,244
Planicie fluvio-lacustre	7,399	3, 4, 5	16,686
Colinas	5,424	5	5,434
Area total afectada	116,860		198,874

horizonte nátrico; en estos suelos se hallan los perfiles magnésicos de tipos 3, 4 y 5 encontrados en el presente estudio.

El sistema taxonómico mencionado considera que un horizonte nátrico es una clase especial de horizonte argílico que tiene, además de las propiedades características de éste, algunas de las que siguen:

- Cualquiera de las dos siguientes:
  - prismas o, más corrientemente, columnas en alguna parte, generalmente en la parte superior, que pueden romperse hasta bloques o pueden no hacerlo; o
  - raramente estructura de bloques y lenguas de un horizonte aluvial, en las cuales hay granos de limo o arcilla no cubiertos, y que se extiende más de 2.5 m dentro del horizonte.
- Además, cualquiera de las dos siguientes:
  - una RAS > 13 (PSI > 15) en algún subhorizonte dentro de los 40 cm siguientes al límite superior; o
  - más  $Mg^{2+}$  y más  $Na^+$  intercambiables que [ $Ca^{2+}$  + acidez intercambiable], a pH 8.2, en algún subhorizonte dentro de

los 40 cm del límite superior, si la RAS > 13 (PSI > 15) en algún horizonte dentro de los 2 m siguientes a la superficie.

Los subhorizontes de los 40 cm superiores del horizonte nátrico pueden tener el  $Ca^{2+}$  como catión intercambiable dominante si los horizontes inferiores tienen, en los 40 cm superiores, la RAS necesaria o el  $Na^+$  suficiente. Algunos de los subhorizontes dichos pueden tener más acidez intercambiable y más  $Ca^{2+}$  que  $Mg^{2+}$  y que  $Na^+$ , si se dan dos condiciones:

- los subhorizontes inferiores (en los 40 cm superiores) presentan dominancia del  $Mg^{2+}$  y del  $Na^+$ ;
- algún horizonte (dentro de los 2 m contados desde la superficie) tiene una RAS > 13 (PSI > 15).

## Conclusiones

La distribución de los cationes  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Na^+$  señala la existencia de cinco perfiles magnésicos (con sus tipos y variantes) en los suelos mencionados. El efecto del sodio en la dispersión de arcillas y en la formación de un horizonte B de arcilla aluvial ha sido reconocido desde hace tiempo; este mismo efecto no ha sido atribuido al  $Mg^{2+}$ , al menos con claridad, por muchos investigadores. En algunas

regiones del mundo, la presencia del  $Mg^{2+}$  se puede relacionar con condiciones físicas pobres o poco deseadas del suelo.

Según el manual americano de taxonomía de suelos (USDA, 1975), el  $Mg^{2+}$  se incluye en la definición del horizonte nátrico porque, a medida que es removido el  $Na^+$ , el  $Mg^{2+}$  lo sigue en la secuencia de lavado si los cloruros son bajos y los sulfatos son altos; en caso de que el lavado continúe, el  $Mg^{2+}$  llega a ser totalmente remplazado. Cuando esta sustitución alcanza el punto en que la cantidad de  $Na^+$  intercambiable es  $> 15\%$  y la cantidad de  $Mg^{2+}$  y de  $Na^+$  es menor que la de  $[Ca^{2+} + \text{acidez intercambiable}]$  —y esto ocurre en los subhorizontes superiores que tengan un espesor de 40 cm o más— el horizonte en cuestión no se considera nátrico.

La discusión anterior pone de manifiesto la dificultad de enmarcar los perfiles 3, 4 y 5, predominantes en muchas áreas del valle del río Cauca, dentro del concepto de perfiles con un horizonte 'diagnóstico' de tipo nátrico. Por ejemplo:

- en el perfil FG-1926 de Palmira (Figura 6), el  $Mg^{2+}$  supera el  $Ca^{2+}$  en casi todo el perfil, mientras que el  $Na^+$  se halla en niveles mínimos ( $< 1 \text{ meq}/100 \text{ g}$ ), lo que no deja aceptar fácilmente la clasificación del USDA (Soil Taxonomy);
- lo mismo ocurre en el perfil FG-2018 de Palmira (Figura 8).

Esta dificultad conduce a un error sistemático en los estudios de suelos realizados en el valle del río Cauca, puesto que esos suelos tienen una saturación de  $Mg^{2+}$  muy alta y una saturación de  $Na^+$  muy baja. Además, la observación visual de cada uno de los perfiles y su descripción ha permitido asociar una situación caracterizada por muchas propiedades físicas —en

especial, las relacionadas con el movimiento del agua en el suelo— a la condición de alta saturación (o de dominancia) del  $Mg^{2+}$  en el complejo de cambio de ese suelo.

- Este hecho da pie a la necesidad de proponer una modificación al sistema básico de clasificación de suelos, la cual introduciría una *categoría especial de suelos salinos* cuya denominación sería 'suelos magnésicos'. Estos suelos deben tenerse como marginales para la producción agrícola en la medida en que la concentración de  $Mg^{2+}$  afecta sus propiedades químicas, físicas y biológicas.
- Actualmente, el área afectada por  $Mg^{2+}$  en el valle del río Cauca no se considera sujeta a un *problema salino* en los estudios de suelos: solamente se menciona en éstos su relación Ca:Mg invertida. Esta situación dificulta mucho el manejo de estos suelos, la política sectorial sobre ellos y el diseño de planes de desarrollo de la región.

## Referencias

- Alperovitch, N.; Shainberg, I.; y Kerev, R. 1981. Specific effect of magnesium on the hydraulic conductivity of sodic soils. *J. Soil Sci.* 32:543-544.
- Antipov-Karataev, I. N. y Filipova, U. N. 1955. The effect of long-term irrigation on soils. En: *Russian Academic Sci. USSR*, Moscú.
- Antipov-Karataev, I. N. y Mamaeva, L. Y. 1958. The role of magnesium in the formation of solonetz properties of soils. *Agrokemia es Talajtan* 7:1-14.
- Arany, S. 1931. Data to the behaviour of magnesium in soils. *Mezőgazdasági Kutatások* 4:439-450.
- Darab, K. 1994. Magnesium in salt affected soils. *Agrokemia es Talajtan* 43(1-2):133-158.



- Darab, K. y Remenyi, M. 1978. Mineralogical composition of < 1 in fraction of magnesium soils in the Hungarian lowland. Trans. 10th Int. Congr. Soil Science. Moscow 7:125-131.
- Emerson, W. W. y Smith, B. H. 1970. Magnesium organic matter and soil structure. Nature 228:453-454.
- García, O. A. 1988. Salinidad en suelos y aguas. En: Fertilidad de suelos, diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. p. 429-473.
- Girdhar, I. K. y Yadav, J. S. P. 1981. Role of magnesium in varying quality irrigation water in influencing soil properties and wheat crop. Agrokemia es Talajtan 30:148-157.
- Kovda, V. A.; vanden Berg, C.; y Hagen, R. M. (eds.) 1967. International source book on irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity. FAO/ UNESCO.
- Máté, F. 1935. Magnesium ion accumulation in the adsorption complex of meadow soil of the Tisza Valley. Agrokemia es Talajtan 4:291-298.
- Ovcharenko, M. N. et al. 1974. On the transformation of primary and secondary minerals in solonetz profiles in North Kaskhstan. Trans 10th. Int. Congr. Soil Sci. Moscow 7:146-153.
- Rahman, W. A. y Rowell, D. L. 1979. The influence of magnesium in saline and sodic soils: A specific effect or a problem of cation exchange? J. Soil Sci. 30: 535-546.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1975. Soil Taxonomy Agriculture Handbook. no. 436. Soil Conservation Service. Washington, D. C. 754 p.

## CAPÍTULO 7

# Degradación del Suelo en Zonas de Agricultura Comercial

*Hugo E. Castro F.\**

### Resumen

La agricultura comercial se desarrolla en Colombia, generalmente, en áreas planas y en climas cálidos que van desde el húmedo hasta el seco. Pertenecen a este tipo de agricultura los cultivos que exigen, para producir un rendimiento óptimo, muchos insumos técnicos, como semillas mejoradas, maquinaria, riego, plaguicidas, correctivos y fertilizantes. Varios de estos cultivos, como arroz, algodón, ajonjolí, maíz, sorgo, soya y caña de azúcar, extraen del suelo continuamente grandes cantidades de nutrimentos. Es pues necesario restituir estos nutrimentos para mantener el nivel de fertilidad.

La pérdida física de suelo y de materia orgánica por erosión, la mecanización excesiva, el cultivo continuo de arroz bajo inundación, la quema de residuos de cosecha, los inadecuados sistemas de riego y drenaje, la alcalinización y la compactación de áreas cultivadas son los problemas que más disminuyen

actualmente la productividad de la tierra en las áreas mencionadas.

Para superar esas limitaciones, hay que aplicar tecnologías modernas y sostenibles enfocando la producción hacia los sistemas de rotación. Los principales factores de manejo de un sistema de producción, que influirían favorablemente en la productividad de la tierra en beneficio de las generaciones futuras, son los siguientes:

- elección de tipos de labranza acordes con el desarrollo físico del suelo;
- siembra e incorporación de abonos verdes en el intervalo entre los dos semestres agrícolas (intersemestre);
- adecuado manejo del agua en el arroz con riego y en el de secano;
- incorporación de los residuos de cosecha para devolver al suelo una parte de los nutrimentos extraídos.

Este artículo presenta algunos resultados experimentales que sobre este manejo del suelo ha obtenido el Programa de Suelos del ICA, en el Centro de Investigaciones Agrícolas (CIA) Nataima, en Espinal, departamento del Tolima, Colombia.

---

\* I.A., M.Sc., Especialista en manejo de suelos. Anteriormente: Programa Nacional de Suelos, ICA; actualmente, Profesor asistente, Facultad de Agronomía, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja.

## Introducción

La zona tropical cálida representa en Colombia, aproximadamente, el 82% del territorio nacional (más de 93 millones de hectáreas). En la franja cálida húmeda y en la cálida muy húmeda se encuentra el 96% de nuestras selvas y sabanas. La mayor intervención agrícola se hace con cultivos comerciales de algodón, arroz, caña de azúcar, sorgo, soya, ajonjolí, maní y frutas tropicales, y ocurre en la franja cálida subhúmeda y en la franja cálida seca.

Se reconoce actualmente que el *uso intensivo y mal dirigido* a que ha estado sometido durante años el suelo en las áreas agrícolas de los valles interandinos, de la región del Caribe y de los Llanos Orientales ha generado una progresiva degradación física, química y biológica del suelo, que se refleja en la presencia de sistemas agrícolas cada vez menos sostenibles.

Los factores que, por ausencia de un buen manejo, han contribuido más a esta degradación son los siguientes: pérdidas de suelo por erosión, pérdida de materia orgánica (M.O.), mecanización excesiva, procesos de salinización y de saturación de sodio, monocultivo de arroz bajo inundación permanente, quema de residuos de cosecha e inadecuados sistemas de riego y drenaje.

Cualquier nueva tecnología para el manejo del suelo debe basarse en el concepto del sistema de producción; por consiguiente, la rotación de cultivos es una estrategia sostenible de la producción agrícola concebida con sentido conservacionista. Permite, en efecto, proyectar el uso de la tierra a varios semestres agrícolas, aprovechando el beneficio que ofrecen las leguminosas como cultivos de rotación o como abonos verdes. Estos se siembran (o incorporan) en el intersemestre, es decir, en el tiempo

comprendido entre la terminación de un semestre agrícola y el inicio del siguiente.

El programa de suelos del CIA Nataima, una estación experimental manejada cerca a la población de Espinal, Tolima, ha evaluado experimentalmente el rendimiento como respuesta significativa de los cultivos en sistemas de rotación. Este artículo presenta los resultados obtenidos en los cultivos de arroz y sorgo al cabo de 8 semestres agrícolas de rotación (1990B a 1994A).

Básicamente, esa información se centra en la aplicación de un *modelo de producción de cultivos* en forma sostenible para el trópico cálido colombiano. Describe, además, la problemática de la degradación del suelo en zonas de agricultura comercial y los resultados experimentales de la producción de arroz y sorgo en sistemas de rotación, incluyendo en éstos la siembra de abonos verdes.

## Problemática del Manejo del Suelo

En el trópico cálido colombiano, la agricultura se desarrolla en áreas planas y en un 80% en condiciones de déficit hídrico. Los suelos presentan un alto índice de degradación física, química y biológica, debido principalmente a factores de mal manejo, de los cuales merecen destacarse los siguientes:

### ***Mecanización excesiva***

La sostenibilidad de la agricultura en la zona considerada sufre el efecto del uso inadecuado de la maquinaria agrícola, es decir, de la aplicación indiscriminada y de la falta de criterios claros sobre la respuesta de los suelos a su acción. En muchas áreas planas de Tolima, Huila, los Llanos Orientales, el valle del río Cauca y la región Caribe,

la mecanización ha causado la pérdida acelerada de la estructura del suelo y la aparición de capas compactas (pisos de arado, pisos de rastra), que limitan el crecimiento de las raíces y no permiten el almacenamiento adecuado de agua en el subsuelo.

Asimismo, el elevado número de *pases de rastrillo* que recibe un suelo ya arado, con el fin de 'desterronararlo', conduce al sellamiento o encostramiento superficial una vez que la lluvia ha actuado sobre las partículas de suelo desprovistas de cohesión estructural. Este fenómeno no sólo aumenta la escorrentía y la erosión, sino que además impide la emergencia de las plántulas y reduce la penetración del agua a través del perfil del suelo. Es, además, una de las razones de la baja producción de algunos cultivos en Colombia.

### **Monocultivo del arroz**

El carácter de explotación agrícola del arroz le ha permitido, en general, explotar el suelo arrocero con siembras continuas a gran escala durante muchos años. Esta actividad, además de compactar y erosionar el suelo con la inundación, promueve una extracción unilateral de nutrientes y la persistencia de malezas, plagas y enfermedades que hacen cada día más onerosos los costos de producción.

La especialización que se ha adquirido en la producción de este cultivo ha influido en la decisión de rotar a gran escala el área cultivada con arroz, a pesar de que el mercado para especies que alternen en la rotación, como la soya, no sea favorable.

### **Pérdida de materia orgánica**

Las áreas agrícolas del trópico cálido colombiano han estado sometidas, durante más de 50 años, a *siembras intensivas* de cultivos que extraen del

suelo grandes cantidades de nutrientes, especialmente de nitrógeno.

En muchos suelos, el contenido de M.O. era, históricamente, superior al 3.5%; actualmente tienen apenas un 1%. Ha disminuido, por consiguiente, su potencial productivo y ha crecido cada día su dependencia de los nutrientes de origen mineral, especialmente de los nitrogenados.

Las siguientes causas han promovido la disminución de la M.O. en los suelos mencionados:

- La tasa elevada de mineralización de la M.O. que haya estado expuesta, en general, a la acción de los cultivos.
- La pérdida de estructura del suelo por la excesiva mecanización; el resultado es un suelo compactado que facilita la erosión superficial hídrica y eólica.
- La máxima rentabilidad de la tierra que siempre persiguen los agricultores, dejando de lado las prácticas conservacionistas que restituyen el desgaste (ya sea químico, físico o biológico) a que se somete el suelo. Agravan este cuadro la quema que se hace de los residuos de la cosecha, el inadecuado manejo del agua, y la ausencia de leguminosas como alternativa de rotación frente a la explotación continua de los cereales.
- La notoria disminución de la M.O. del suelo y el efecto en éste de la inundación y de la compactación han desactivado parcialmente la acción biológica del suelo.

### **Alcalinización del suelo**

Este factor ha limitado el uso del suelo, principalmente en las zonas agrícolas más secas. Según el diagnóstico más

reciente, en Colombia hay alrededor de 600,000 ha afectadas por la presencia de sales o de sodio. Algunas de estas áreas son conocidas en el trópico cálido de las regiones antes mencionadas.

Generalmente, los procesos de alcalinización pueden explicarse por la presencia en el suelo de sales solubles (bicarbonatos, sulfatos, carbonatos, etc.) de sodio y magnesio intercambiables que dominan el complejo de cambio, y de carbonatos y sales de sodio en combinación. Estos problemas químicos han sido inducidos, generalmente, por la falta de un drenaje eficiente que evacúe las aguas de riego en un distrito de riego. En otros casos, la explicación está en la composición mineralógica del material original del suelo o en el ascenso de aguas freáticas ricas en calcio, magnesio, potasio y sodio.

## **Recomendaciones para el Manejo Sostenible del Suelo en la Agricultura Comercial**

Los resultados del ICA que se discuten enseguida corresponden a la década 1983-1993.

### ***Selección del sistema de labranza***

El crecimiento de las raíces afecta la eficiencia de las plantas para absorber el agua y los nutrimentos del suelo. De esta eficiencia dependerá, en gran parte, la expresión del potencial genético de producción vegetal que poseen las semillas. Ahora bien, el suelo debe ofrecer a las raíces de las plantas las características adecuadas para que se cumpla este proceso.

No todos los *suelos* presentan el mismo desarrollo físico; es necesario, por tanto, seleccionar el sistema de labranza más apropiado tanto para las

características físicas del suelo como para los requerimientos de la especie que se plantará. En otras palabras, no conviene aplicar el mismo método de labranza a todos los suelos y cultivos.

Es recomendable que, antes de cualquier siembra, se examine el suelo mediante calicatas (dimensiones: 1 x 1 x 1 m) en sitios representativos del lote, con el fin de visualizar y evaluar algunas propiedades físicas del suelo; esta evaluación permitirá definir técnicamente el tipo de laboreo compatible con el grado de desarrollo físico del suelo. Las *propiedades físicas* más importantes para evaluar son:

- Profundidad disponible para el enraizamiento.
- Presencia de capas duras e impermeables (clay-pan, hard-pan, pisos de arado, pisos de rastra, etc.).
- Color, que es índice del contenido de M.O., del grado de estructuración y de la porosidad.
- Actividad de macroorganismos (presencia de lombrices, termitas, etc.).
- Textura: tipo y continuidad.
- Drenaje interno (presencia o ausencia de moteados pardo-rojizos y grisáceos).
- Densidad aparente, que es índice del grado de compactación.
- Nivel freático.
- Limitantes químicas: presencia de horizontes cálcicos, salinos o sódicos y concentración de aluminio (se conocen determinando el pH por colorimetría en el campo).

Aunque pocos trabajos de investigación han evaluado los parámetros del suelo compatibles con las exigencias técnicas en los sistemas

de preparación del suelo, el Programa de Suelos del ICA presenta (Cuadro 1) una aproximación a este problema, es decir, los posibles criterios con que se elegiría la labranza apropiada según el grado de desarrollo físico que presente el suelo. Estos criterios se apoyan en las investigaciones realizadas en el CIA Nataima sobre labranza profunda y en los trabajos de tesis llevados a cabo en Tibaitatá por estudiantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, de Santafé de Bogotá.

### **Manejo de los residuos de cosecha**

El interés por evitar las pérdidas de suelo y por mantener la fertilidad del suelo a largo plazo ha dado inusitada importancia al aprovechamiento de los residuos vegetales que deja la operación de cosecha en la superficie del terreno; el objetivo final es dar un manejo conservacionista y sostenible al suelo. La mayoría de los especialistas concuerdan actualmente en que un sistema de labranza se considera

Cuadro 1. Criterios para seleccionar el sistema de labranza más apropiado al grado de desarrollo físico de un suelo.

Característica del suelo	Labranza cero y siembra directa	Labranza convencional reducida	Labranza en caballones	Labranza profunda
1. Profundidad efectiva de las raíces	> 60 cm	> 60 cm	Limitante (texturas finas)	Limitante de profundidad (capas duras e impermeables)
2. Cambios abruptos de textura (0-60 cm)	No existen	Leves a moderados	Texturas finas hasta 60 cm	Contraste; textura abrupta
3. Grado de estructura	Fuerte	Moderada a fuerte	Tendencia a masiva	Débil (compactación)
4. Consistencia en húmedo	Friable	Friable a firme	Muy firme	Firme a suelta
5. Porosidad total	50-60	40-50	35-40	< 35
6. Drenaje interno	Moderado a rápido	Moderado a rápido	Lento	Moderado a lento
7. Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	< 1.2	< 1.5	> 1.5	> 1.5
8. Espacio aéreo, macroporos (%)	10-12	10-12	< 10	< 10
9. M.O. (%)	Alta	Intermedia a alta	Intermedia a baja	Baja
10. Presencia de raíces (0-60 cm)	Abundantes	Regulares	Pocas	Poca
11. Orden taxonómico del suelo	Molisoles, Andisoles, Inceptisoles, Oxisoles	Molisoles, Andisoles, Inceptisoles, Oxisoles	Vertisoles, Alfisoles	Alfisoles, Vertisoles, Inceptisoles, Oxisoles

FUENTE: Castro (1995).

conservacionista cuando incorpora al suelo el 76% de los residuos del cultivo anterior. La cantidad de residuos producidos por un cultivo anterior depende de su rendimiento y de la naturaleza de la especie cultivada (Cuadro 2). El uso de los residuos de cosecha (como cobertura o incorporados) trae los siguientes beneficios:

- Mitiga el impacto de las *gotas de lluvia* que, sin la cobertura vegetal, golpearían directamente la superficie desprendiendo partículas de suelo.
- Evita o reduce el *efecto compresor* causado por las gotas de lluvia, mejorando así las tasas de infiltración y el almacenamiento de agua en el suelo.
- Reduce la velocidad de *escurrimiento del agua* y su capacidad de arrastrar las partículas desprendidas del suelo.
- Controla la *erosión del viento* porque reduce la velocidad de éste en la superficie del suelo, evitando así que gran parte de la fuerza directa del viento llegue hasta las partículas erosionables; atrapa además las partículas del suelo en movimiento.
- Restituye parcialmente al suelo algunos nutrientes químicos; por ejemplo, el potasio extraído por los

cereales o el nitrógeno que aporta el cultivo de leguminosas.

Se ha medido experimentalmente la capacidad *de restitución de nutrientes* al suelo a partir de residuos vegetales incorporados inmediatamente después de la cosecha (Cuadro 3). Los datos corresponden a experimentos sobre rotación de cultivos desarrollados durante 4 años en el CIA Nataima, en Espinal, Tolima.

### **Rotación de cultivos y abonos verdes**

Aunque se conocen las grandes ventajas que ofrecen la rotación de cultivos y los abonos verdes a la producción sostenible de un cultivo, la

Cuadro 3. Capacidad de restitución de nutrientes al suelo mediante la incorporación de residuos de cosecha, en los experimentos sobre rotación de cultivos del Programa de Suelos del ICA. CIA Nataima, en Colombia. 1991-1993.

Tipo de residuo	Nutrientes aportados (kg/ha)					
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	S
Tamo de arroz <sup>a</sup>	35	20	120	18	12	6
Residuos de sorgo <sup>b</sup>	67	67	147	43	27	10

- Son 9 t/ha, provenientes de una cosecha promedio de 6 t/ha de arroz en cáscara (paddy).
- Son 12 t/ha, provenientes de una cosecha promedio de 3 t/ha de sorgo en grano.

Cuadro 2. Cuantificación de los residuos secos dejados por algunos cultivos después de la cosecha, en los experimentos sobre rotación de cultivos hechos en el CIA Nataima, en Colombia.

Cultivo <sup>a</sup>	Relación grano:residuo <sup>b</sup>	Residuos (t/ha) <sup>c</sup>				Promedio (t/ha)
		N <sub>0</sub>	N <sub>50</sub>	N <sub>100</sub>	N <sub>150</sub>	
Arroz	1:2.5	5.0	9.1	15.6	16.8	11.6
Sorgo	1:4.5	12.4	16.0	20.1	23.2	17.9
Soya	1:1	2.4	2.7	3.4	3.5	3.0

- Variedades: Oryzica-3, Icaima, Soyica N-22.
- Aportes de raíces, tallos, hojas.
- Aportes según el nivel de fertilización nitrogenada aplicado en el cultivo.

aplicación de ambas prácticas en la agricultura colombiana es muy limitada. Además, en muy pocas investigaciones se han cuantificado los beneficios agronómicos, ecológicos y de conservación del suelo que ofrecen esas prácticas de manejo.

**Justificación y ensayos.** El incremento en los costos de producción de casi todos los productos agrícolas de las regiones mencionadas (valles interandinos, Llanos Orientales y el Caribe) ha hecho necesaria la rotación de cultivos para lograr dos propósitos: amortiguar el impacto de malezas y enfermedades y reducir el costo de la fertilización (con el nitrógeno de las leguminosas que rotan o se incorporan como abono verde). Estas prácticas son hoy la mejor alternativa para aumentar la *productividad del suelo* y disminuir los efectos que ejerce en éste el monocultivo.

La incorporación de abonos verdes es, hasta donde las condiciones de humedad lo permiten, una contribución económica y eficaz al mejoramiento de la fertilidad del suelo. La importancia de ciertas leguminosas como abonos verdes deriva de las siguientes características:

- son una fuente de nitrógeno lenta y duradera;
- liberan y movilizan los nutrientes del suelo;
- mejoran las condiciones de humedad del suelo;
- incrementan la actividad microbiana;
- defienden el suelo contra la erosión.

En 1990 se estableció en el CIA Nataima un experimento sobre rotación de cultivos y uso de abonos verdes, con el fin de conocer dos efectos:

- la tendencia del rendimiento de varios cultivos cuando se sembraban en rotación;
- el influjo favorable que podían causar los abonos verdes en la economía del nitrógeno.

Se evaluaron los tipos de rotación más comunes en el valle del Alto Magdalena (departamentos de Tolima y Huila), y se tomó como testigo el monocultivo de las especies ensayadas, en el mismo sitio y durante un tiempo prolongado. Se ensayaron las siguientes variedades:

de arroz, la variedad Oryzica 3; de algodón, Gozzica N<sub>23</sub>; de sorgo, Icaima; de soya, Soyica N<sub>22</sub>; y como abono verde, *Crotalaria juncea* L.

Los factores constantes de la experimentación fueron la fertilización fosfórica y potásica y los elementos menores, en cantidades de 23 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 30 kg/ha de K<sub>2</sub>O y 10 kg/ha de Borozinco 240G, respectivamente. La incorporación de residuos de cosecha al término de cada semestre agrícola se tomó también como factor constante de manejo. La única variable de fertilización fue el nitrógeno, en dosis de N<sub>0</sub>, N<sub>50</sub>, N<sub>100</sub> y N<sub>150</sub> para cada una de las cuatro rotaciones, respectivamente.

**Resultados.** Los Cuadros 4 y 5 muestran los resultados obtenidos en los sistemas de producción de arroz y sorgo en rotación.

Se observa en el Cuadro 4 que se obtuvieron los mayores rendimientos de arroz paddy —en cada uno de los niveles de nitrógeno estudiados— cuando se sembró el arroz después de incorporar, entre los 2 semestres, un abono verde (*C. juncea*). En este ensayo fue posible incrementar el rendimiento de arroz paddy en 1.25 t/ha con respecto al monocultivo del arroz, en el lote en que se había sembrado sorgo. En el lote en que se había sembrado soya, el rendimiento



Cuadro 4. Producción de arroz (variedad Oryzica 3) en rotación con otros cultivos. Resultados experimentales del Programa de Suelos del ICA en el CIA Nataima, en Colombia, entre 1990B y 1993B.<sup>a</sup>

Sistema de rotación			Rendimiento de arroz paddy (kg/ha) <sup>b</sup> con:				Rendimiento según sistema (kg/ha)
Sem. A	Intersem.	Sem. B	N <sub>0</sub>	N <sub>50</sub>	N <sub>100</sub>	N <sub>150</sub>	
Arroz		Arroz	2432	4300	5427	6263	4605 c
Sorgo		Arroz	2655	4885	5383	6222	4786 c
Soya		Arroz	2817	5041	6582	6245	5171 b
Sorgo	Crotalaria	Arroz	3114	5894	6883	7193	5848 a
Rendimiento según niveles de nitrógeno			2829 c	5030 b	6069 a	6481 a	

a. C.V. = 8.8%; DMS<sub>0.05</sub> para rotaciones = 475 kg; DMS<sub>0.05</sub> para nitrógeno = 475 kg; Intersem. = Intersemestre.

b. Con 15% de humedad.

Cuadro 5. Producción de sorgo (variedad Icaima) en rotación con otros cultivos. Resultados experimentales del Programa de Suelos del ICA en el CIA Nataima, en Colombia, entre 1990B y 1993B.<sup>a</sup>

Sistema de rotación			Rendimiento de sorgo (kg/ha) <sup>b</sup> con:				Rendimiento según sistema (kg/ha)
Sem. A	Intersem.	Sem. B	N <sub>0</sub>	N <sub>50</sub>	N <sub>100</sub>	N <sub>150</sub>	
Sorgo		Sorgo	1769	<u>2524</u>	<u>3341</u>	<u>3914</u>	2887 c
Arroz		Sorgo	1861	3018	3461	3561	2875 c
Algodón		Sorgo	1934	2879	3828	4137	3194 c
Soya		Sorgo	<u>2908</u>	3370	4102	4158	3634 b
Arroz	Crotalaria	Sorgo	<u>3416</u>	<u>4037</u>	4258	4524	4059 a
Rendimiento según niveles de nitrógeno			2378 c	3166 b	3798 a	4059 a	

a. C.V. = 10.11%; DMS<sub>0.05</sub> para rotaciones = 401 kg; DMS<sub>0.05</sub> para nitrógeno = 337 kg; Intersem. = intersemestre.

b. Con 15% de humedad.

del arroz ocupó el segundo lugar y superó al monocultivo en todos los niveles de nitrógeno, excepto en el N<sub>150</sub>. Producir arroz después de soya en el mismo lote representó un incremento de 0.6 t/ha de paddy con respecto al monocultivo arroz-arroz del ensayo de rotación. No se registraron diferencias significativas estadísticamente en el rendimiento del arroz en los lotes provenientes de siembras de arroz o de sorgo.

Los mayores rendimientos de sorgo, en cada uno de los niveles de

nitrógeno estudiados, se obtuvieron cuando se sembró sorgo después de incorporar, entre los 2 semestres, un abono verde (*C. juncea*) en lotes en que se había sembrado antes arroz (Cuadro 5). El promedio de los aumentos de rendimiento con respecto al monocultivo sorgo-sorgo es de 1.2 t/ha. El rendimiento de sorgo en el lote en que se había sembrado soya ocupó el segundo lugar en este ensayo de rotación, y superó significativamente al monocultivo en todos los niveles de nitrógeno, excepto en el de N<sub>150</sub> en que

los rendimientos fueron similares. Producir sorgo después de soya en el mismo lote representa un incremento promedio de 0.75 t/ha con respecto al monocultivo sorgo-sorgo del ensayo de rotación. El rendimiento de sorgo después de algodón en la rotación ocupó el tercer lugar, y superó significativamente al monocultivo sorgo-sorgo en el nivel  $N_{100}$ . No se observaron diferencias significativas estadísticamente entre el rendimiento de sorgo obtenido en lotes provenientes de cultivos de arroz o de sorgo (monocultivo).

En cuanto a la *economía del nitrógeno*, es posible ahorrar hasta 100 kg/ha de N sin afectar el rendimiento del sorgo cuando se siembra este cereal en lotes en que se había incorporado un abono verde. Este resultado se observa, por ejemplo, comparando el rendimiento en los niveles  $N_0$  y  $N_{50}$  de las parcelas en que se incorporó crotalaria (rotación algodón-crotalaria-sorgo) con el obtenido en los niveles  $N_{100}$  y  $N_{150}$ , respectivamente, del monocultivo sorgo-sorgo. Se ahorran igualmente 50 kg/ha de N cuando en los lotes se ha sembrado antes soya; compárense, por ejemplo, los niveles  $N_{50}$  de soya-sorgo (3370 kg/ha) y  $N_{100}$  de sorgo-sorgo (3341 kg/ha): se obtuvo igual rendimiento con menos N, en el primer caso.

En el monocultivo sorgo-sorgo —y en las rotaciones algodón-sorgo y arroz-sorgo— hay una respuesta positiva del sorgo al incremento gradual del N, que cesa al pasar al nivel de 150 kg/ha de N. Estas dos últimas rotaciones no generan una economía de nitrógeno respecto al monocultivo sorgo-sorgo en ninguna, prácticamente, de las comparaciones que se hagan entre niveles de N aplicados. En cambio, la incorporación de abonos verdes y la rotación con soya sí economizan nitrógeno de fertilización, como se comentó antes.

## Conclusiones

Una interpretación del rendimiento obtenido de arroz y de sorgo en los sistemas de rotación evaluados revela en ambos cultivos la misma tendencia, es decir, la superación espectacular del rendimiento cuando se cultivan después de incorporar abonos verdes al suelo o en rotación con soya.

El ensayo demuestra que las dos prácticas permiten manejar estos cultivos dentro de un sistema de producción sostenible desde el punto de vista ecológico y económico.

El siguiente cuadro presenta un modelo sostenible *de manejo integral del suelo*, es decir, que incluya todos sus componentes:

Componente físico	Componente químico	Componente biológico
Técnicas de labranza apropiadas	Aprovechamiento de la fertilidad natural del suelo	Mejorar el contenido de M.O.
Manejo de residuos de cosecha	Restitución de nutrimentos al suelo	Biofertilización
Incorporación de abonos verdes	Selección de genotipos adaptados a bajos niveles de fertilización	Fijación del nitrógeno
Uso de coberturas del suelo	Fertilización eficiente:	Hongos de micorrizas
Rotación de cultivos	- Dosis adecuada	Compostajes
Adecuado manejo del riego y del drenaje	- Epocas de aplicación	Humificación
Control de la erosión	- Selección de fuentes	Materiales de actividad biológica (estiércol, abonos verdes)
	- Métodos de aplicación	

## **Referencias**

- Amézquita, C. E. 1988. Algunas consideraciones agroclimáticas y edáficas para el manejo integral del suelo. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Santafé de Bogotá. 35 p. (Multicopiado.)
- Castro, F. H. 1992. Producción de arroz en sistemas de rotación. En: Taller sobre Manejo de los Recursos Suelo-Agua. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y Fedearroz, Distribución Río Recio, Lérída (Tolima), Colombia. p. 37-51.
- Castro, F. H. 1993. La agricultura empresarial y sus efectos en la degradación del suelo. Revista Flash Universitario. Vol. 11, no. 45.
- Castro, F. H. 1995. Bases técnicas para el conocimiento y manejo de los suelos del valle cálido del Alto Magdalena. Manual técnico. Programa de Suelos, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), CIA Nataima, Espinal (Tolima), Colombia.
- Castro, F. H. y Amézquita, C. E. 1991. Sistemas de labranza y producción de cultivos en suelos con limitantes físicas. Suelos Ecuat. 21(1):21-28.
- Gutiérrez, P. D. 1988. Efecto de la rotación de cultivos y de los abonos verdes en la producción de arroz. Suelos Ecuat. 18(1):113-118.
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). [1987, 1988, 1990, 1991, 1995]. Informe anual de actividades del Programa Regional de Suelos. CIA Nataima, Espinal (Tolima), Colombia. (p.v.)