

COBERTURA VEGETAL Y EROSIÓN DEL SUELO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ BAJO SOMBRA

Vegetal Cover and Soil Erosion in Shaded Coffee Agroforestry Systems

Joel Pérez Nieto^{1‡}, Eduardo Valdés Velarde¹ y Víctor M. Ordaz Chaparro²

RESUMEN

La investigación sobre la magnitud y forma en que la cobertura vegetal controla la tasa de erosión del suelo en sistemas agroforestales es escasa. El objetivo de esta investigación fue analizar la relación entre la cobertura vegetal y la pérdida de suelo por erosión hídrica para proponer valores del factor cobertura y manejo (Factor C) de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) en diferentes sistemas agroforestales de café bajo sombra. Mediante análisis de regresión, fueron analizados datos provenientes de cinco microcuencas ubicadas en una región tropical de Veracruz, México. Las coberturas arbustiva y por mantillo ajustada por su espesor, mostraron mejores relaciones exponenciales congruentes con la tasa de pérdida de suelo ($R^2 = 0.70$ y $R^2 = 0.87$). El factor cobertura arbustiva y por mantillo en sistemas agroforestales de café bajo sombra (Cam) propuesto como factor sustituto del Factor C en la EUPS, explicó 68% de la variación de la pérdida de suelo. El intervalo de valores del Factor Cam varió entre 0.02 y 0.003 para sistemas agroforestales de café bajo sombra, valores mayores al valor más pequeño correspondiente a tierras forestales no disturbadas y menores al valor más grande correspondiente a potreros, praderas permanentes y tierras ociosas cubiertas por vegetación.

Palabras clave: agroforestería, Factor C de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

SUMMARY

There is little research on the magnitude of soil erosion in agroforestry systems and how vegetation cover controls the rate. The objective of this research

was to examine the relationship between plant cover and soil loss by water erosion to propose values of coverage and management factor (C Factor) of the Universal Soil Loss Equation (USLE) in different shade coffee agroforestry systems. Using regression analysis, data from five micro-watersheds located in a tropical region of Veracruz, Mexico, were analyzed. Shrub and litter cover, adjusted by thickness, showed better exponential relationships congruent with the rate of loss of soil ($R^2 = 0.70$ and $R^2 = 0.87$). The shrub and litter cover factor (Cam) in shade coffee agroforestry systems, proposed as substitute factor c in the USLE cover factor, explained 68% of the variation of soil loss. The interval of the Cam Factor varied from 0.02 to 0.003 for shade coffee agroforestry systems; values greater than the smallest value corresponded to undisturbed forest lands and the largest value corresponding to pastures, permanent grasslands and abandoned land covered by vegetation.

Index words: agroforestry, C Factor of the Universal Soil Loss Equation.

INTRODUCCIÓN

La superficie de café cultivada en México es de 761 161 ha (CEFP, 2001). Existen cinco sistemas de producción de café: sistema natural o rusticano, policultivo tradicional, policultivo comercial, especializado y a pleno sol (Escamilla *et al.*, 1994). El sistema rusticano abarca entre el 30 y 40% de los productores, mientras que los sistemas policultivo tradicional y comercial representan entre el 50 y 60% del área cafetalera en México (Moguel y Toledo, 1999).

Los sistemas agroforestales poseen una alta capacidad para controlar la erosión del suelo, incluidos los sistemas de café bajo sombra (Young, 1989; Ataroff y Monasterio, 1997). Sin embargo, a pesar de que la estructura de los sistemas agroforestales de café bajo sombra se ha estudiado desde el siglo XIX (Beer *et al.*, 1998), la disponibilidad de resultados de investigación que expliquen la magnitud y forma en que la diversidad

¹ Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo Estado de México.

[‡] Autor responsable (jpereznl14@hotmail.com)

² Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo Estado de México.

y estructura de los diferentes estratos vegetales controlan el grado de erosión hídrica del suelo es escasa. Villavicencio y Valdez (2003) analizaron la estructura arbórea del sistema agroforestal rusticano de café en Veracruz y reportaron índices de diversidad de Shannon (H') de 2.51 a 3.44, valores menores a los índices determinados para el sistema de selva mediana subperennifolia (3.40 a 3.58); asimismo, señalaron que el sistema agroforestal de café rusticano conserva un gran número de especies propias de la selva mediana subperennifolia, no obstante que posee menor diversidad de especies arbóreas.

Los sistemas agroforestales pueden reducir la erosividad de la lluvia disminuyendo la pérdida de suelo; sin embargo, esta relación no se ha cuantificado en todos los sistemas agroforestales (Young, 1989 y Nair *et al.*, 1994). Hipotéticamente, un dosel vegetal alto, amplio y denso puede incrementar la energía cinética de las gotas de lluvia y causar una erosión laminar sustancial por el impacto de las gotas sobre el suelo, por lo que un dosel vegetal bajo y denso podría reducir la erosividad de la lluvia, y por lo tanto la pérdida de suelo. La presencia de capas múltiples de dosel vegetal pueden reducir considerablemente la velocidad de caída de las gotas de lluvia reduciendo la severidad de su impacto, y el mantillo y los residuos de la poda de los árboles dejados sobre la superficie del suelo pueden protegerlo efectivamente de la erosividad del escurrimiento superficial (Omoró y Nair, 1993; Beer *et al.*, 1998). Beer *et al.* (1998) señalan que el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo son más bajos en plantaciones de café bajo sombra que en plantaciones sin sombra.

En Guatemala, con una precipitación pluvial anual de 3138 mm hubo escurrimientos superficiales de 2271 mm de agua (72%) en un terreno de maíz, 471 mm (15%) en un cafetal joven bajo sombra y 133 mm (4.2%) en un cafetal adulto (Anónimo, 1992). En el estado de Trujillo, Venezuela, con una precipitación pluvial anual de 1012 mm, en un cafetal con árboles de sombra, otro sin sombra y uno más con árboles frutales, la pérdida de suelo fue 0.34, 0.42 y 0.77 Mg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente y estuvo afectada por la cantidad de lluvia, la protección de la cobertura vegetal y el mantillo, así como por las prácticas agronómicas de manejo y cosecha, las cuales causaron perturbaciones en la cobertura vegetal y suelo (Arellano, 2001). La pérdida de partículas de suelo menores a 4 mm fue 0.79 y 0.43 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en una plantación de café bajo sombra y 1.57 y 0.73 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en otro sin sombra en los Andes,

Venezuela, en los dos años evaluados (Ataroff y Monasterio, 1997).

Para estimar la pérdida de suelo, Wischmeier y Smith (1978) incluyeron el factor cobertura y manejo vegetal (Factor C) en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS). Este factor estima el efecto combinado de todas las variables interrelacionadas de cobertura y manejo vegetal, su valor es 1 cuando el suelo está desnudo y conforme se incrementa la cobertura su valor tiende a cero. Se ha evaluado el Factor C en sistemas agrícolas (McGregor y Mutchler, 1983; Ríos y Martínez, 1990; Narayan y Bhushan, 2000), pero pocos estudios se han realizado en sistemas agroforestales de café.

El efecto combinado de la cobertura arbórea, arbustiva y superficial por mantillo que caracteriza a los sistemas agroforestales de café sobre la pérdida de suelo, puede ser de difícil determinación. Wischmeier (1975), propuso valores del Factor C para tierras forestales dividiéndolo en subfactores: cobertura arbórea, cobertura superficial y uso del suelo. Con base en ello, Wischmeier y Smith (1978) asignaron valores de 0.0001 a 0.009 al Factor C para tierras forestales no disturbadas y de 0.003 a 0.42 para potreros, praderas permanentes y tierras ociosas cubiertas con árboles de 4 m de altura. DeTar *et al.* (1980) modificaron estos subfactores y desarrollaron el factor características de la cobertura vegetal superficial (Cp) para paisajes forestales de ladera, mientras que Dismeyer y Foster (1981), reportaron valores del factor Cp de 0.115 y 0.004 para dos sitios forestales.

Los valores del Factor C calculados por El-Hassanin *et al.* (1993) a partir de la tasa de pérdida de suelo en parcelas con vegetación forestal, pastos y cultivados (desnudos) variaron de 0.064 a 0.353; mientras que, los valores determinados a partir de las características de la cobertura vegetal superficial (DeTar *et al.*, 1980) para las mismas parcelas, variaron de 0.004 a 0.114. Los valores más altos fueron para suelos cultivados y los más bajos para vegetación forestal y pastos. Rufino *et al.* (1985) reportaron un valor de 0.6568 del Factor C para un suelo clasificado como Latosol bajo café, con 6% de pendiente en el Estado de Paraná, Brasil, comparable con los valores reportados para suelos cultivados con muy poca cobertura. Congruente con lo anterior y considerando que la tasa de pérdida de suelo en sistemas agroforestales de café varía entre la pérdida en tierras forestales no disturbadas, y la pérdida en potreros, praderas permanentes y tierras ociosas (Pérez-Nieto *et al.*, 2005), los valores del Factor C para sistemas

agroforestales de café podrían variar en el rango de estos sistemas.

El objetivo del trabajo realizado fue determinar la relación entre la cobertura vegetal y la pérdida de suelo por erosión hídrica con el fin de proponer valores del Factor C de la EUPS en diferentes sistemas agroforestales de café bajo sombra.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Sitio y Sistemas Evaluados

La investigación se realizó en la superficie total de cinco microcuencas de la comunidad El Coyol, Tlachichilco, Veracruz, México, 20° 40' 32" N y 98° 10' 12" O, a 600 m de altitud. La temperatura media anual es de 21.6 °C y la precipitación media anual es de 1707 mm (García, 1988). Las características de las microcuencas variaron de 267 a 723 m² de área, 27.5 a 41.9% de pendiente del terreno y de 4.1 a 6.2% de contenido de materia orgánica del suelo. Mayores detalles de las microcuencas fueron reportadas por Pérez-Nieto *et al.* (2005). En cada microcuenca se evaluó un sistema agroforestal de café bajo sombra (Cuadro 1).

Diversidad y Cobertura Vegetal

La diversidad vegetal se determinó a través de un inventario e identificación taxonómica de las especies en las microcuencas y mediante los índices de diversidad de Shannon (1) y de Simpson (2) (Franco *et al.*, 1995; Stiling, 1999).

$$H' = -\sum p_i \ln p_i \quad (1)$$

donde: H' = índice de diversidad de Shannon; p_i = proporción de individuos de la *i*-ésima especie (%).

$$D = \sum p_i^2 \quad (2)$$

donde: D = índice de diversidad de Simpson; p_i = proporción de individuos de la *i*-ésima especie (%).

La estructura vegetal se determinó calculando la altura y midiendo la cobertura vegetal, la cual se determinó por estratos en cada microcuenca durante 2000 y 2001.

La cobertura arbórea y arbustiva se determinó por el método de la línea Canfield (Franco *et al.*, 1995), trazando una línea en el sentido de la pendiente principal y otra perpendicular a ella en cada microcuenca. La proporción de cobertura se determinó mediante la Ecuación (3):

$$CT = (L - LSD / L) 100 \quad (3)$$

donde: CT = cobertura vegetal total (%); L = longitud total de las líneas trabajadas (cm); LSD = longitud de suelo desnudo (cm).

La cobertura herbácea y superficial por mantillo, se determinaron por el método del cuadrante (Franco *et al.*, 1995). Los valores de cobertura superficial fueron ajustados por el espesor promedio del mantillo, considerando como 100% al espesor máximo.

Los valores de cobertura vegetal determinados por estrato y fechas de muestreo, se promediaron en cada microcuenca por año y los promedios fueron

Cuadro 1. Sistemas agroforestales de café evaluados.

Microcuenca	Sistema agroforestal de café	Clase de suelo
1	Sistema agroforestal rusticano (SAF-RUS)	Mollisol (Soil Survey Staff, 1998) o Phaeozem Gleyico (FAO, 1998)
2	Policultivo tradicional mejorado (PTM) con barreras vivas de palo de agua (<i>Eupatorium morifolium</i> Mill) y terrazas individuales (PTM-BVyT)	
3	PTM con cobertura de canavalia (<i>Canavalia ensiformis</i> (L) De Candolle) (PTM-CCV)	Inceptisol (Soil Survey Staff, 1998) o Cambisol Crómico (FAO, 1998)
4	PTM con cobertura de cacahuatillo (<i>Arachis pintoi</i> Krap & Greg nom. nud. (Cook)) (PTM-CCH)	
5	PTM con barreras vivas de palo de agua y palma camedor (<i>Chamaedorea elegans</i> Mart) (PTM-BV)	

relacionados con la pérdida media anual de suelo. La pérdida media anual de suelo se determinó colocando en la salida de cada microcuena, un sistema muestreador tipo Coshocton del escurrimiento superficial diario. Mediante una muestra de agua con sedimentos escurrida diariamente, se determinó la pérdida de suelo en la muestra evaporando el agua en una estufa. Multiplicando cantidad de sedimentos en la muestra por el volumen de agua escurrido diariamente, se obtuvo la pérdida de suelo diaria. Sumando la pérdida de suelo diaria de todos los eventos de lluvia ocurridos durante el año, se obtuvo la pérdida media anual de suelo, para cada microcuena.

Determinación del Factor Cam y Análisis de Regresión

La ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) (Wischmeier y Smith, 1978) es:

$$A = R K L S C P \quad (4)$$

donde: A = pérdida promedio anual de suelo (Mg ha^{-1}), R = factor erosividad de la lluvia ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$), K = factor erosionabilidad del suelo ($\text{Mg ha h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$), L = factor longitud de la pendiente (adimensional), S = factor grado de la pendiente (adimensional), C = factor cobertura y manejo de cultivos (adimensional) y P = factor prácticas mecánicas de conservación (adimensional).

El factor cobertura arbustiva y por mantillo para sistemas agroforestales de café bajo sombra (Cam), propuesto en lugar del Factor C de la EUPS, se determinó como sigue: se analizó la relación dependiente entre la pérdida media anual de suelo con las coberturas arbórea, arbustiva, herbácea y por mantillo (esta última ajustada por su espesor) mediante regresión, seleccionando los tipos de cobertura arbustiva y por mantillo que explicaron mejor la pérdida de suelo.

Se propusieron alternativamente series de valores del Factor C intermedios entre el valor más pequeño de 0.0001 y el valor más grande de 0.42, correspondientes a tierras forestales no disturbadas; y a potreros, praderas permanentes y tierras ociosas reportados por Wischmeier y Smith (1978).

Las series de valores propuestos del Factor C se relacionaron con proporciones hipotéticas de cobertura arbustiva y por mantillo hasta encontrar la ecuación

exponencial que conjuntamente estimó mejor la serie de valores propuestos de C.

La mejor serie de valores propuestos denominada Cam, fue la que mostró el mayor y consistente coeficiente de determinación (R^2) en su relación lineal con la pérdida de suelo observada, después de evaluar los modelos exponencial y potencial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diversidad Vegetal

En el estrato arbóreo y arbustivo del sistema rusticano se encontró menor cantidad de árboles y arbustos, mientras que en el sistema PTM (Policultivo Tradicional Mejorado) se observó mayor cantidad de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas resultado de la diversificación productiva con plantas de uso múltiple (Cuadro 2). Semejante a lo reportado por Villavicencio y Valdez (2003), el índice de diversidad de Shannon mostró menor diversidad vegetal para el sistema rusticano comparado con el PTM. El índice de diversidad Simpson reflejó mayor dominancia de pocas especies vegetales en el sistema rusticano comparado con la menor dominancia de muchas especies en el PTM, lo cual diversifica la salida de productos, incluyendo alimentos, forrajes, maderas y servicios, a diferencia del sistema rusticano donde se obtienen menos productos y servicios. De acuerdo con Escamilla *et al.* (1994), el SAF-RUS estudiado pertenece al sistema rusticano, mientras que los PTM-BVyT, PTM-CCV, PTM-CCH y PTM-BV pertenecen al sistema PTM.

Estructura Vegetal Arbórea y Arbustiva

En la Figura 1, verticalmente se observan bien diferenciados el estrato arbóreo constituido por los árboles nativos y el arbustivo por el café en el sistema rusticano. Estos dos estratos también se observan en el sistema PTM, pero el estrato arbóreo se conforma por árboles de sombra y frutales, y el arbustivo por los cafetos y el palo de agua, este último usado como barrera viva. Horizontalmente, se observa una sobreposición y proyección muy densa de las copas de los árboles y arbustos en el sistema rusticano, lo que probablemente dificulta el flujo de luz solar a la superficie del suelo; mientras que la sobreposición y proyección de las copas de los árboles y arbustos en el PTM es poco densa,

permitiendo mayor flujo de luz solar a la superficie del suelo, lo que favorece el crecimiento y abundancia de plantas herbáceas y constituye la principal diferencia estructural entre ambos sistemas. Estas similitudes y diferencias estructurales se reflejan en la pérdida de suelo.

Cobertura Vegetal y Pérdida de Suelo

La pérdida media de suelo en los sistemas agroforestales de café bajo sombra estudiados fue 0.42, 0.41, 1.95, 2.02 y 1.05 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para SAF-RUS, PTM-BVyT, PTM-CCV, PTM-CCH y PTM-BV en 2000, y de 0.34, 1.05, 4.56, 4.24 y 0.28 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en 2001. La explicación de este comportamiento en términos de la lluvia y del escurrimiento superficial, se realizó en una publicación previa (Pérez-Nieto *et al.*, 2005). En esta sección se explica el comportamiento de la pérdida de suelo en términos de la cobertura vegetal aérea y superficial. Las relaciones entre la pérdida de suelo con los estratos de cobertura estudiados se presentan en la Figura 2.

Cobertura del estrato arbóreo. La cobertura arbórea promedio representada principalmente por los árboles de sombra y frutales fluctuó entre 87 y 100%, y mostró una relación exponencial negativa muy baja con la pérdida de suelo en ambos años (Figuras 2a y 2b). Los bajos coeficientes de determinación (R²) indican que la cobertura arbórea explica insignificativamente la disminución de la pérdida de suelo, probablemente debido a su mayor altura que va de 5 a 15m (Figuras 1a y 1c) y

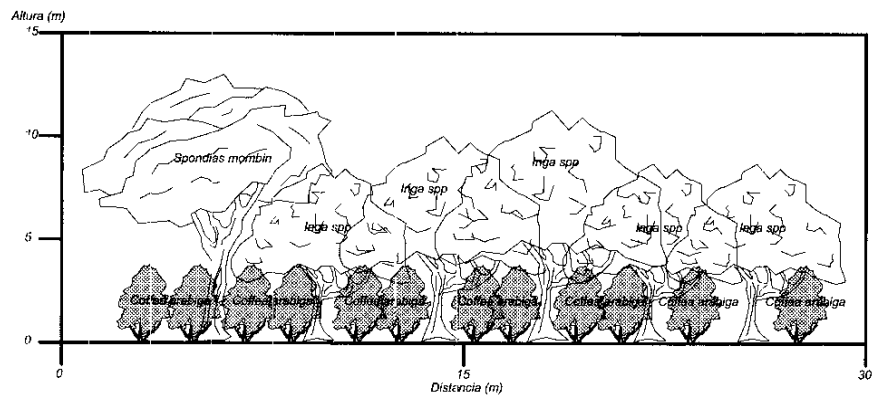
a su cobertura homogénea cercana al 100%. Esto apoya el supuesto de Young (1989) y de Nair *et al.* (1994) de que, un dosel vegetal alto y amplio no disminuye la pérdida de suelo e incluso puede aumentarla debido al incremento de la erosividad de la lluvia. En consecuencia, un dosel vegetal bajo y denso podría reducir la erosividad de la lluvia.

Cobertura del estrato arbustivo. La cobertura arbustiva promedio representada principalmente por los arbustos de café, fluctuó entre 13 y 100% (Cuadro 3) y mostró una relación exponencial negativa alta en 2000 y media en 2001 (Figuras 2c y 2d) congruente con la pérdida de suelo. Los coeficientes de determinación (R²) indican que la cobertura arbustiva explica entre el 57 y 70% la disminución de la pérdida de suelo, probablemente debido a su altura promedio de 2 m (Figuras 1a y 1c) y a su mayor densidad de población. Esto corrobora el supuesto de que un dosel vegetal bajo y denso puede amortiguar la erosividad de la lluvia, por lo que puede ser útil para calcular la pérdida de suelo (Young, 1989 y Nair *et al.* 1994).

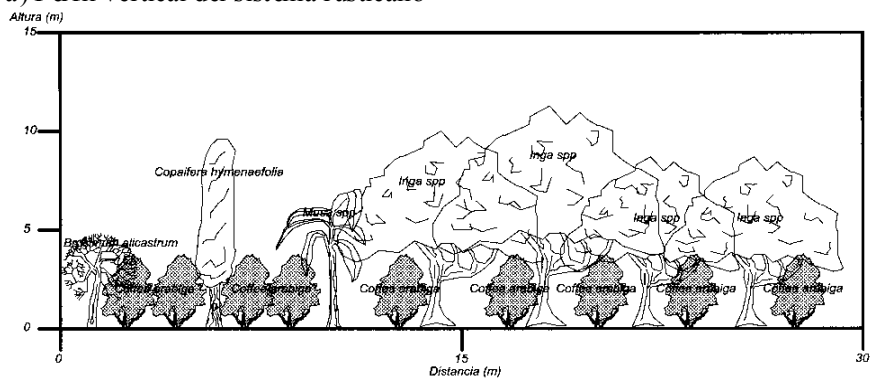
Cobertura del estrato herbáceo. La cobertura herbácea promedio representada principalmente por las especies de cobertura como palma camedor, canavalia y cacahuatillo, osciló entre 19 y 97%. Esta cobertura herbácea mostró una relación exponencial positiva baja y alta, pero incongruente con la pérdida de suelo (Figuras 2e y 2f); el sentido positivo de la relación indica que la cobertura herbácea no explica la variación de la pérdida de suelo debido a su alta relación lineal negativa (R² = 0.77) mostrada con la cobertura por mantillo.

Cuadro 2. Diversidad vegetal de sistemas agroforestales de café bajo sombra.

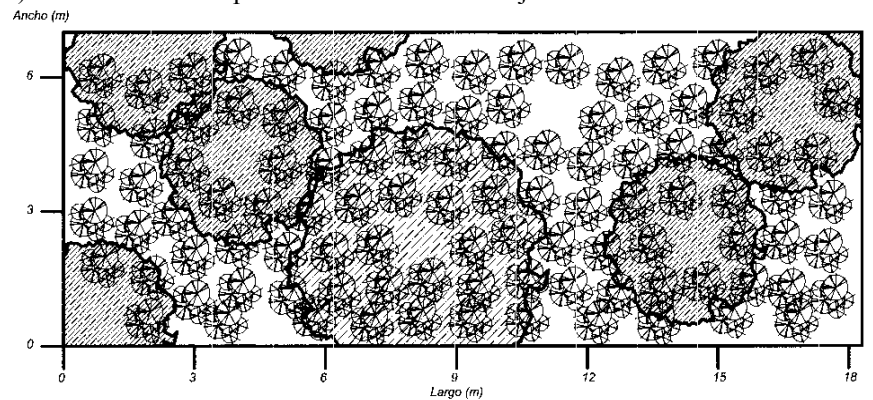
Estrato	Sistema rusticano	Policultivo tradicional mejorado (PTM)
Arbóreo	Chalahuite (<i>Inga</i> spp.), ramón (<i>Brosimum alicastrum</i>) y pioche (<i>Melia azedarach</i>)	Chalahuite (<i>Inga</i> spp.), ramón (<i>Brosimum alicastrum</i>), pioche (<i>Melia azedarach</i>), quebrache (<i>Copaifera hymenaeifolia</i>), teshua (<i>Miconia argentea</i>), plátano (<i>Musa</i> spp.), naranja (<i>Citrus sinensis</i>), mango (<i>Mangifera indica</i>), cacao (<i>Teobroma cacao</i>), aguacate (<i>Persea americana</i>), mamey (<i>Pouteria sapota</i>), macadamia (<i>Macadamia</i> spp), cedro rojo (<i>Cedrela odorata</i>), suchicuauil (<i>Cordia alliodora</i>), vara de caballo (<i>Gliricidia sepium</i>), pemuche (<i>Erytrina</i> spp.) y canela (<i>Cinnamomum zeylanicum</i>)
Arbustivo y herbáceo	Café	Café, palo de agua (<i>Eupatorium morifolium</i>), palma camedor (<i>Chamaedorea elegans</i>), canavalia (<i>Canavalia ensiformis</i>) y cacahuatillo (<i>Arachis pintoi</i>)
Shannon	2.47	2.54
Simpson	0.14	0.09



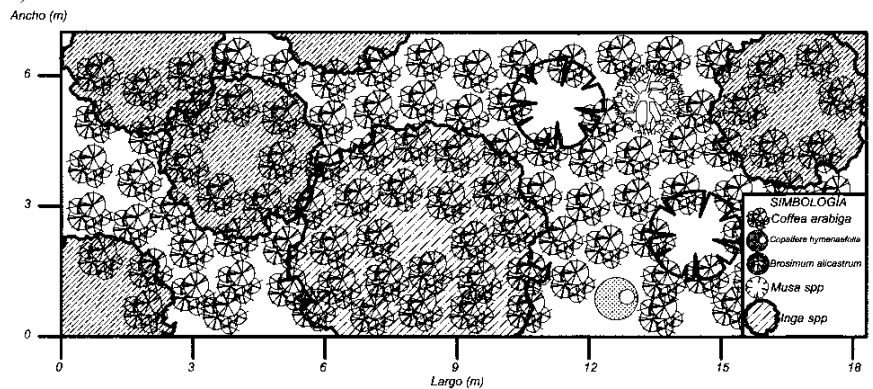
a) Perfil vertical del sistema rusticano



c) Perfil vertical del policultivo tradicional mejorado



b) Perfil horizontal del sistema rusticano



d) Perfil horizontal del policultivo tradicional mejorado

Figura 1. Estructura vegetal arbórea de sistemas agroforestales de café bajo sombra.

Cobertura del estrato superficial (mantillo). Aunque la cobertura del estrato superficial por mantillo en los sistemas agroforestales de café bajo sombra fue superior al 50%, su efecto sobre la pérdida de suelo se explicó

mejor al ser ajustada por su espesor. La cobertura del estrato superficial promedio ajustada por el espesor del mantillo y representada principalmente por la hojarasca y por los residuos de las podas de los árboles de sombra,

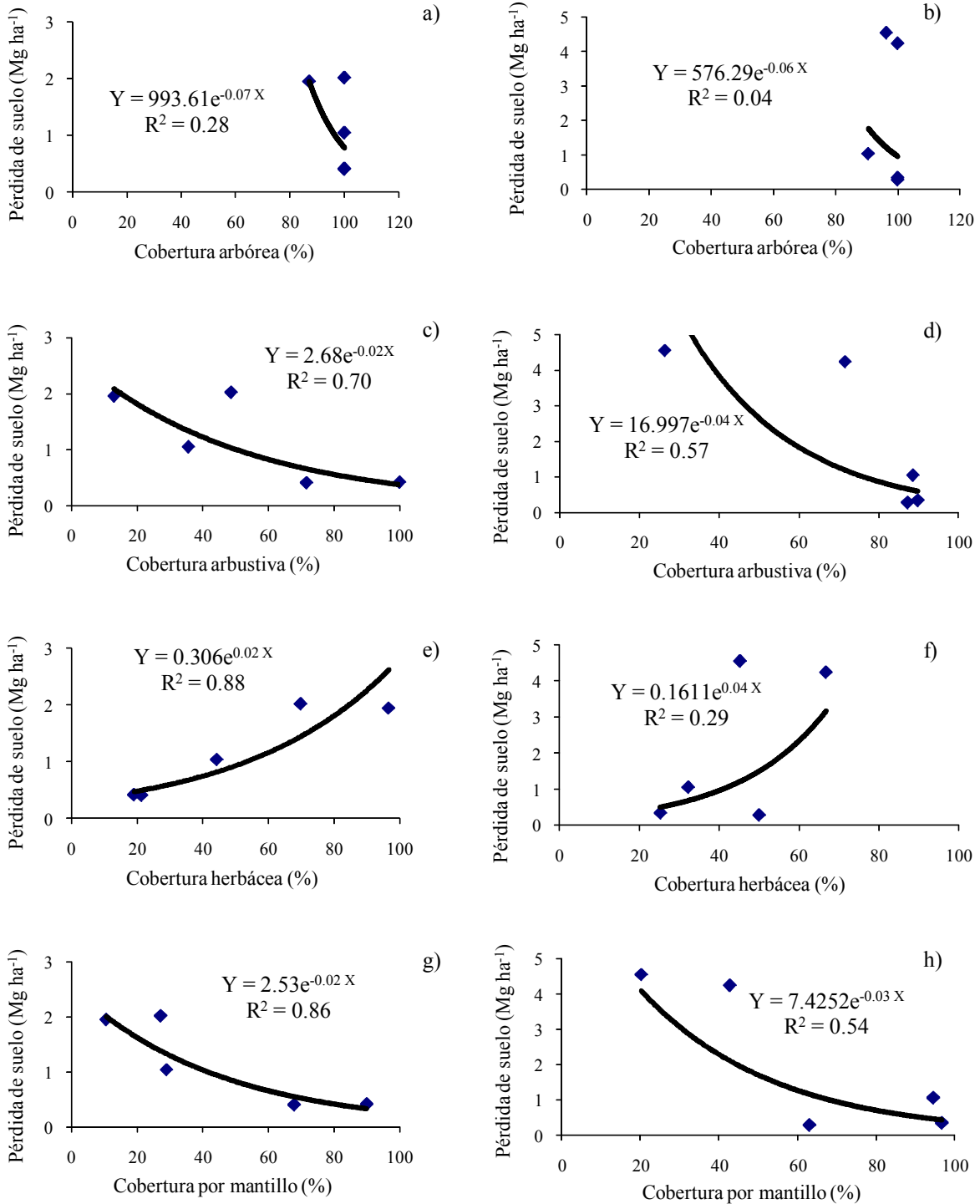


Figura 2. Relación de la cobertura vegetal arbórea (a y b), arbustiva (c y d), herbácea (e y f) y por mantillo (g y h) con la pérdida de suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra en 2000 (izquierda) y 2001 (derecha).

osciló entre 11 y 97% (Cuadro 3). Esta cobertura mostró una relación exponencial negativa de media a alta y congruente con la pérdida de suelo (Figuras 2g y 2h). Los coeficientes de determinación (R^2) indican que la cobertura por mantillo explica entre 54 y 86% la disminución de la pérdida de suelo, lo cual apoya los supuestos planteados por Omoro y Nair (1993) y por Beer *et al.* (1998), de que la hojarasca y residuos de la poda de árboles que yacen sobre la superficie del suelo, pueden protegerlo efectivamente contra la erosión. Las relaciones exponenciales negativas, aceptables y congruentes encontradas entre las coberturas arbustiva y por mantillo y la tasa de pérdida de suelo con coeficientes de pendiente de la curva de 0.02 a 0.04 sustentan la hipótesis de que la presencia de estratos múltiples de cobertura vegetal en los sistemas agroforestales de café bajo sombra, pueden reducir la pérdida de suelo por erosión.

Factor Cobertura y Manejo (Cam) Propuesto de la EUPS

En virtud de que las coberturas arbustiva y por mantillo fueron los tipos de cobertura que mejor se relacionaron con la pérdida de suelo y ante la inexistencia de un Factor C para sistemas agroforestales, en este trabajo se propone el Factor Cobertura arbustiva y por mantillo del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra (Cam) como factor sustituto del Factor C en la EUPS definido por Wischmeier y Smith (1978). Semejante al Factor C, el Factor Cam propuesto es

el resultado de relacionar la cobertura arbustiva y por mantillo con la tasa de erosión del suelo, considerando que la cobertura por mantillo se debe ajustar por su espesor, para mejorar su poder explicativo de la pérdida de suelo. En este trabajo, la cobertura por mantillo ajustada (Figura 3b) explicó exponencialmente mejor la variación de la pérdida de suelo, que sin ajustar (Figura 3a).

El Factor Cam propuesto evalúa el efecto combinado de la cobertura arbustiva y por mantillo ajustada por su espesor sobre la tasa anual de pérdida de suelo, mediante la Ecuación exponencial (5).

$$\text{Cam} = 0.02 \text{ EXP}(-0.01 X_a) \text{ EXP}(-0.01 X_m) \quad (5)$$

donde: Cam = factor cobertura arbustiva y por mantillo de la EUPS en sistemas agroforestales de café bajo sombra; X_a = cobertura arbustiva (%); X_m = cobertura por mantillo ajustada por su espesor (%).

En la Figura 4a se observa que la cobertura arbustiva es igualmente efectiva que la cobertura por mantillo para reducir la pérdida de suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra, esto cuando las coberturas son iguales en un momento dado, ya que cuando se podan los árboles su cobertura disminuye; en este caso, el efecto interactivo y complementario de la cobertura arbustiva al variar la cobertura por mantillo se ilustra en la Figura 4b. La cobertura arbustiva dispersa principalmente la energía cinética de la lluvia reduciendo el impacto directo de las gotas lluvia sobre los agregados del suelo; complementariamente, el mantillo además de

Cuadro 3. Factor cobertura y manejo (Cam) en sistemas agroforestales de café bajo sombra.

Sistema agro-forestal	Año 2000			Año 2001		
	Cobertura		Factor Cam	Cobertura		Factor Cam
	Arbustiva	Mantillo [†]		Arbustiva	Mantillo [†]	
	----- % -----		----- % -----			
SAF-RUS	100	90	0.003	90	97	0.003
PTM-BVyT	72	68	0.005	89	95	0.003
PTM-CCV	13	11	0.016	26	20	0.013
PTM-CCH	49	27	0.009	72	43	0.006
PTM-BV	36	29	0.01	87	63	0.004

SAF-RUS = sistema agroforestal rustico; PTM-BVyT = policultivo tradicional mejorado con barreras vivas de palo de agua (*Eupatorium morifolium* Mill) y terrazas individuales; PTM-CCV = policultivo tradicional mejorado con cobertura de canavalia (*Canavalia ensiformis* (L) De Candolle); PTM-CCH = policultivo tradicional mejorado con cobertura de cacahuatillo (*Arachis pintoi* Krap & Greg. nud. (Cook)); PTM-BV = policultivo tradicional mejorado con barreras vivas de palo de agua y palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart). [†] Ajustada por su espesor considerando como 100% el valor máximo. ζ = adimensional.

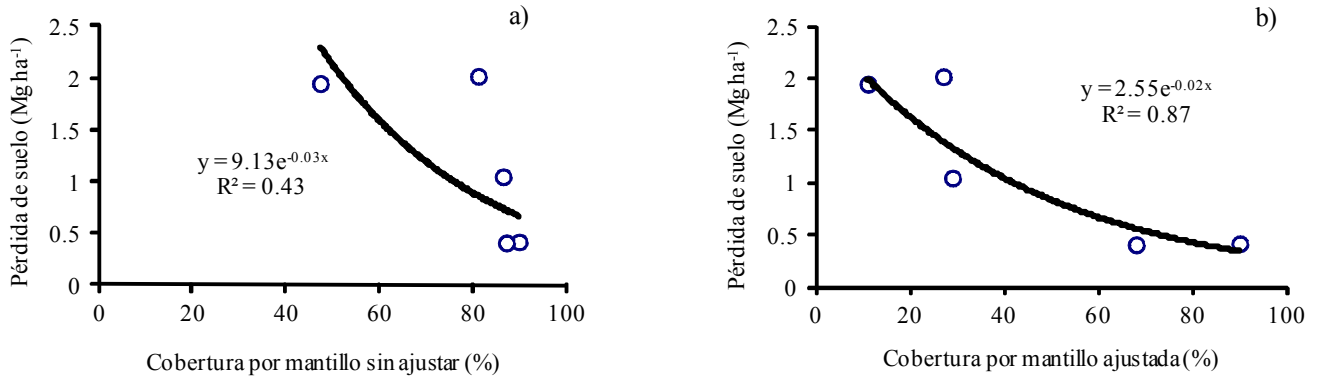


Figura 3. Efecto de la cobertura del suelo por mantillo sin ajustar (a) y ajustada por su espesor (b) sobre la pérdida de suelo en el 2000.

dispersar la energía cinética de las gotas que llegan a la superficie del suelo, dispersa la energía y capacidad de transporte del escurrimiento superficial.

La forma exponencial de la relación entre la cobertura del suelo y el Factor Cam propuesto, significa que cuando el suelo está predominantemente descubierto, un incremento pequeño en la cobertura arbustiva y por mantillo reduce significativamente la tasa de pérdida de suelo; en cambio, cuando el suelo está cubierto en gran proporción, un incremento grande en la cobertura reduce muy poco la tasa de pérdida de suelo. Los valores del Factor Cam varían de 0.02 a 0.003, disminuyendo exponencialmente a mayor cobertura arbustiva y por mantillo a partir de 0.02 y cuando ambas coberturas llegan al 100%, Cam alcanza su valor mínimo posible de 0.003. Este rango de valores es el más apropiado para sistemas agroforestales de café bajo sombra, ya que es mayor al valor más pequeño de 0.0001 correspondiente a tierras forestales no disturbadas y menor a los valores más grandes para potreros, praderas permanentes

y tierras ociosas considerados por Wischmeier y Smith (1978).

Pérdida de Suelo y Factor Cam Propuesto

Los valores calculados del Factor Cam propuesto para los sistemas agroforestales estudiados aplicando la Ecuación 2 se presentan en el Cuadro 3. A pesar de su menor diversidad vegetal, pero acorde con su mayor cobertura arbustiva y por mantillo, el sistema agroforestal rusticano presentó los valores más bajos de Cam que los sistemas de PTM. Esta tendencia se refleja en la relación lineal positiva y congruente encontrada del Factor Cam con la pérdida de suelo (Figuras 5a y 5b). El Factor Cam propuesto explicó 68% de la variación de la pérdida de suelo observada en los dos años estudiados, por lo que podría usarse como componente de la EUPS para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en sistemas agroforestales de café bajo sombra.

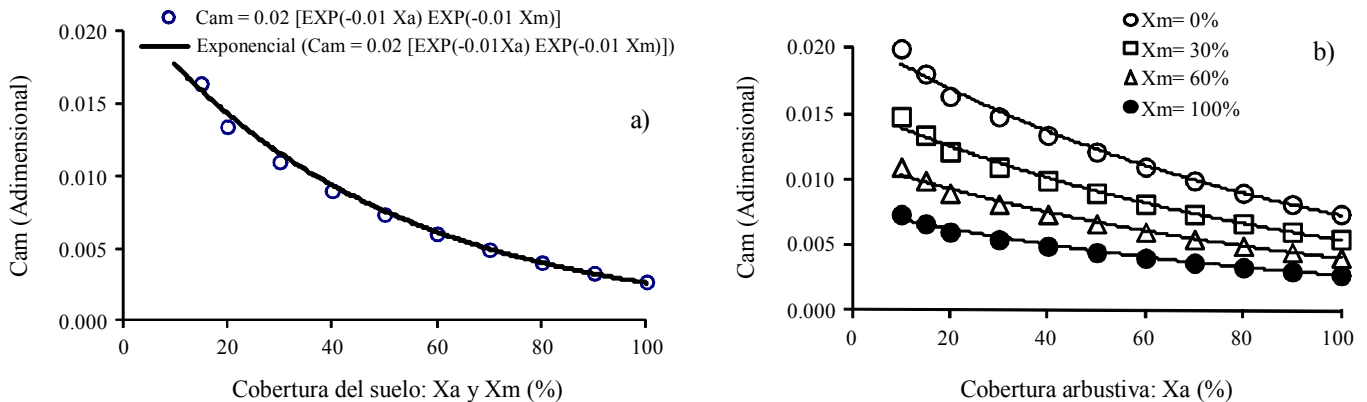


Figura 4. Relación exponencial (a) e interacción (b) del factor cobertura arbustiva y por mantillo (Cam) de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo con la cobertura arbustiva (Xa) y por mantillo (Xm) del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra.

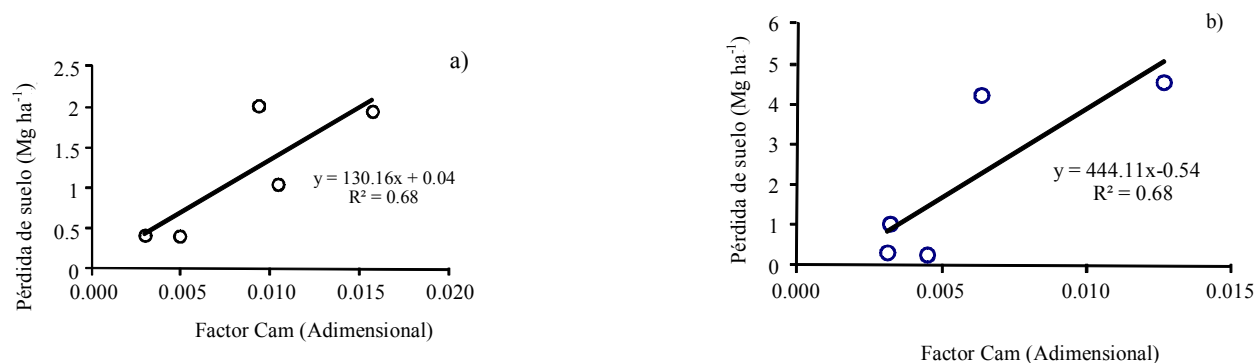


Figura 5. Relación de la pérdida de suelo con el Factor Cam propuesto de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) en los años 2000 (a) y 2001 (b).

Parte de la variación de la pérdida de suelo no explicada por el Factor Cam propuesto fue explicada por la erosividad de la lluvia y del escurrimiento (Pérez-Nieto *et al.*, 2005) la otra parte puede explicarse integralmente incorporando los factores erosionabilidad del suelo, longitud y grado de la pendiente, y prácticas de conservación en la EUPS (Wischmeier y Smith, 1978).

CONCLUSIONES

Las coberturas arbustiva y por mantillo mostraron relaciones exponenciales negativas aceptables y congruentes con la tasa de pérdida de suelo por erosión hídrica ($R^2 = 0.57$ y 0.70 , y $R^2 = 0.54$ y 0.87), mostrando que estos dos estratos son los más importantes para reducir la erosividad de la lluvia y del escurrimiento superficial en sistemas agroforestales de café bajo sombra. El factor cobertura arbustiva y por mantillo en sistemas agroforestales de café bajo sombra (Cam) propuesto como factor sustituto del Factor C en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, explicó el 68% de la variación de la pérdida de suelo. El rango de valores del Factor Cam más apropiado para sistemas agroforestales de café bajo sombra varió de 0.02 a 0.003, valores mayores al valor más pequeño correspondiente a tierras forestales no disturbadas y menores al valor más grande correspondiente a potreros, praderas permanentes y tierras ociosas cubiertas por dosel vegetal.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue auspiciado por el Consejo Nacional de Ciencia Tecnología (CONACYT) mediante el proyecto 31436-B y por la Universidad Autónoma Chapingo, México.

LITERATURA CITADA

- Anónimo. 1992. Café: un cultivo conservacionista del ambiente. Cafetal 319: 11-13.
- Arellano G., R. 2001. Evaluación del escurrimiento y pérdida de suelo en agrosistemas de café. Rev. Forestal Venezolana 45: 9-14.
- Ataroff, M. and M. Monasterio. 1997. Soil erosion under different management of coffee plantations in the Venezuelan Andes. Soil Technol. 11: 95-108.
- Beer, J., R. Muschler, D. Kass, and E. Somarriba. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. Agrofor. Syst. 38: 139-164.
- CEFP (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas). 2001. El mercado de café en México. Cámara de Diputados. H. Congreso de la Unión. México, D. F.
- DeTar, W. R., J. J. Ross, and R. L. Cunningham. 1980. Estimating the C-factor in the universal soil loss equation for landscaped slopes. J. Soil Water Conserv. 35: 40-41.
- Dissmeyer, G. E. and G. R. Foster. 1981. Estimating the cover-management factor (C) in the Universal Soil Loss Equation for forest conditions. J. Soil Water Conserv. 36:235-240.
- El-Hassanin, A. S., T. M. Labib, and E. I. Gaber. 1993. Effect of vegetation cover and land slope on runoff and soil losses from the watersheds of Burundi. Agric. Ecosyst. Environ. 43: 301-308.
- Escamilla P., E., A. Licona V., S. Díaz C., H. V. Santoyo C., R. Sosa y L. Rodríguez R. 1994. Los sistemas de producción de café en el centro de Veracruz, México. Un análisis tecnológico. Rev. Historia. Univ. Costa Rica 30: 41-67.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1998. World reference base for soil resources. Roma, Italy.
- Franco, L., J., G. De la Cruz A., A. Cruz G., A. Rocha R., N. Navarrete S., G. Flores M., E. Cato M., S. Sánchez C., L. G. Abarca A., C. M. Bedia S. 1995. Manual de Ecología. Trillas. México, D. F.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- McGregor, K. C. and C. K. Mutcler. 1983. C factor for no-tilled and reduced-till corn. Trans. ASAE 26: 785-788.

- Moguel, P. y V. M. Toledo. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of México. *Conserv. Biol.* 13: 11-21.
- Nair, P. K. R., M. R. Rao, and E. C. M. Fernandes. 1994. Tree crop interactions in sustainable agroforestry systems. 15th World Congress of Soil Science. Volume 7a Commission, VI Simposia. pp: 110-137. Acapulco, Guerrero, México.
- Narayan, D. and L. S. Bhushan. 2000. Erosion in relation to canopy development under different crops in deep alluvial soils. *Indian J. Soil Conserv.* 28: 198-203.
- Omore, L. M. A., and P. K. R. Nair. 1993. Effects of mulching with multipurpose-tree prunings on soil and water run-off under semi-arid conditions in Kenya. *Agrofor. Syst.* 22: 225-239.
- Pérez-Nieto, J., E. Valdés V., M. E. Hernández San R. y V. Ordaz Ch. 2005. Lluvia, escurrimiento superficial y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Agrociencia* 39: 409-418.
- Ríos B., J. D. y M. R. Martínez M. 1990. Efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo. *Agrociencia* 1: 61-73.
- Rufino, R. L., J. C. Henkhan, and R. C. M. Biscaia. 1985. Influence of management practices and a coffee crop on soil loss. *Rev. Brasil. Ciência Solo* 9: 277-280.
- Soil Survey Staff. 1998. Keys to soil taxonomy. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA.
- Stiling, D. P. 1999. Ecology: Theories and applications. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ USA.
- Villavicencio E., L. y J. I. Valdez H. 2003. Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal rusticano de café en San Miguel, Veracruz, México. *Agrociencia* 37: 413-423.
- Wischmeier, W. H. 1975. Estimating the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed areas. pp: 118-124. *In: Proc. Sediment Yield Workshop. ARS-S-40, USDA. Washington, DC, USA.*
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion-a guide to conservation planning. USDA Agri. Handb. No. 537 US. Government printing office. Washington, DC, USA.
- Young A. 1989. Agroforestry for soil conservation. ICRAF, Nairobi and CAB International, UK.