

# MODELO PREDICTIVO PARA CUANTIFICAR LA EROSIÓN HÍDRICA CON BASE EN EXPERIMENTACIÓN EN SABRINSKI MUNICIPIO DE MOSQUERA <sup>1</sup>

**Palabras clave:** Erosión hídrica, modelo predictivo, Sabrinski, Cundinamarca, Colombia.

**Key words:** Hidric erosion, predictiv model, Sabrinski, Cundinamarca, Colombia.

*Carlos Francisco García Olmos<sup>2</sup>, Orlando Riaño Melo<sup>3</sup>, Edwin Ricardo Ochoa Cruz<sup>4</sup>, Adriana Marcela Achury Arias<sup>4</sup>*

## RESUMEN

La zona de Sabrinski, situada al suroeste de Bogotá, D. C. es de montañas tropicales y suelos de origen volcánico. Allí se establecieron 24 parcelas de escorrentía en pendientes del 15% a 50%, bajo tres tipos de coberturas: una forestal de pinos y eucalipto, una de vegetación propia de la zona, denominada rastrojo y una de suelo desnudo como referencia. Se realizaron durante un año mediciones de las pérdidas de suelo. Se recopiló la información correspondiente y se comparó frente a la obtenida mediante el cálculo con los modelos de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), Modelo Predictivo de Pérdida de Suelo para el Sudeste de África llamado Slemsa y el Modelo de Morgan, Morgan y Finney. Mediante análisis de varianza se determinaron como variables fundamentales del proceso de erosión en la zona: el suelo, la pendiente y el tipo de cobertura vegetal, con lo cual el modelo seleccionado fue el Slemsa, del cual se ajustó el factor X, que involucra el de la pendiente, y con el análisis de modelos de regresión se obtuvo como ecuación  $f(S)$  una expresión de segundo grado.

## ABSTRACT

The zone of Sabrinski is situated to the Southwest of Bogotá, D.C., of the tropical mountains and the soils of the volcanic origin. There, was

established 24 parcels of the runoff of the slopes of the 15 al 50% under 3 types of the covering that they were of the forester with pines and eucalyptus, own vegetable plantation of the zone named rastrojos, and the nude soil like reference. The project has been executable during one year of the measurement of the soil losses. The correspondent information was recompiled and compared front of the information to obtain by the calculus with the models of the Universal Soil Loss Equation, USLE, for the Soil Losses for the southeast of the Africa named SLEMSA and The model of the Morgan, Morgan and Finney, by the analysis of the variant is decided how the fundamental variables of the process of the erosion within the zone of the slope and the type of the vegetable covering with that is adjusted electioneer, was the SLEMSA, of from it factor «X» that it involucres the factor of the slope and with the analysis of the models of the regression is obtained how the equation  $f(S)$  of the expression of the second grade.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de la problemática ambiental del país relacionada con el recurso hídrico y la conservación de suelos, está el fenómeno erosivo, que por medio de sus diferentes manifestaciones, tales como el desgaste de la superficie terrestre identificado como erosión laminar, va desnudando los suelos

<sup>1</sup> Proyecto financiado por el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, MSc, Ph.D. Profesor titular de la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<sup>3</sup> Matemático, Ingeniero de Sistemas y Computación, Especialista SIG, Profesor de la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<sup>4</sup> Ingeniero Forestal Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

al eliminar de ellos la capa orgánica que permite la presencia de la cobertura vegetal, cuando se transportan en el agua sedimentos en suspensión que se desprenden desde las vertientes de las cuencas hasta los ríos y embalses (Lecarpentier, 1977).

La erosión va deteriorando los recursos naturales de su entorno y reduciendo su productividad económica. Es el caso del empobrecimiento de los suelos, la pérdida de la capa más valiosa para el desarrollo de los cultivos.

Para implementar planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas que permitan en el corto, mediano y largo plazo controlar este fenómeno de destrucción del potencial del suelo, se requiere un conocimiento preciso de la distribución espacial de la erosión y de un instrumento que permita su estimación bajo diferentes condiciones del suelo, su uso y manejo.

El área de Sabrinski en el departamento de Cundinamarca, es de 4.000 hectáreas, caracterizadas por ser muy susceptibles a los procesos erosivos, dadas sus condiciones especiales de zona desértica, definida ecológicamente en la clasificación de Holdridge como bs-MB, con una precipitación media anual de 647,6 mm, en donde es de especial importancia conocer su comportamiento a fin de controlar la erosión y alcanzar su plena recuperación (Lecarpentier, 1977).

En búsqueda de un instrumento aplicable en la zona de estudio, que se pueda hacer extensivo a áreas mayores mediante modificaciones, que permita a través del conocimiento de las variables más relevantes del fenómeno determinar las pérdidas de suelo, se hace necesaria esta investigación. Teniendo en cuenta que los modelos disponibles, entre ellos el más utilizado en Colombia: la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS), se precisa para su aplicación de una gran cantidad de información, muchas veces no disponible en gran parte del territorio nacional (Wischmeier y Smith, 1978).

La aplicación de la EUPS, así sea teniendo en cuenta los ajustes hechos por Vega (1988), o García

(1998), presenta dificultades de disponibilidad de información para poder hacer el cálculo de las pérdidas de suelo producidas por erosión hídrica, razón por la cual se busca hallar un modelo más sencillo, que permita la estimación de las pérdidas de suelo con un margen de confiabilidad adecuado.

El modelo de cálculo de erosión hídrica que se propone, por su estructura permite estimar con facilidad las pérdidas de suelo, al tener en cuenta que los aspectos más relevantes en el fenómeno erosivo son su uso y manejo, de los cuales casi siempre se dispone de la información. Esta situación hace posible que mediante un modelo apropiado a nuestras condiciones ambientales, se represente en forma aproximada cómo sucede el fenómeno erosivo. Para ello se tienen en cuenta solo las variables más relevantes.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

- \* Determinar un modelo predictivo de erosión hídrica aplicable en Sabrinski, que genere la información necesaria para su control.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- \* Determinar las variables más relevantes para formular un modelo de fácil aplicación en el área en experimentación.
- \* Establecer la relación existente entre las variables más importantes del proceso erosivo en el área en estudio y su modelización.
- \* Demostrar la aplicabilidad del modelo propuesto en la determinación de las tasas de erosión y su control en el caso de Sabrinski.

## MARCO TEÓRICO

La erosión pluvial es producida por el impacto de las gotas de lluvia que afectan principalmente la estructura de la capa superficial del suelo, ya sea en terrenos planos o en laderas; este proceso se acentúa cuando la superficie está desprotegida y conlleva el desplazamiento de partículas que son movilizadas por el escurrimiento, ocasionando

endurecimiento de la superficie y, por consiguiente, el aumento de la escorrentía superficial.

La erosión por escurrimiento difuso se caracteriza por la formación de hilos de agua sobre la superficie, los cuales se dividen y posteriormente recorren pocos metros para filtrarse en la tierra, depositando el material fino arrastrado en forma de surcos que luego desaparecen con los aguaceros.

Para estudiar la degradación del suelo deben tenerse en cuenta los aspectos físicos del ambiente (suelo, topografía, clima), y aquellos sitios que están relacionados con la actividad humana y que tienden a degradarse paulatinamente con el paso del tiempo.

Los modelos del proceso de erosión hídrica se pueden clasificar en modelos de misterio o de caja negra, modelos estocásticos y modelos de componentes.

Los modelos de misterio o de caja negra se estructuran utilizando como herramientas métodos de regresión múltiple, con logaritmos de producción de sedimentos y otras variables (Flaxman, 1972; Meeuwigg, 1970), para configurar una forma multiplicativa de ecuación como la EUPS. En este tipo de modelos la mayor cantidad de variables se encuentra en lo relacionado con el suelo, hecho que denota la dificultad para identificar su influencia sobre las tasas de erosión (Thornes, 1980; Morgan, 1997).

La EUPS (Wischmeier y Smith, 1978) es el modelo de pérdidas de suelo más ampliamente aplicado en diversos países del mundo desde fines de los años sesenta. Sin embargo, a esta ecuación se le puede hacer una serie de observaciones como se anota a continuación:

La EUPS se basa para la estimación de la erosión en la multiplicación de los factores de erodabilidad del suelo, agresividad de las lluvias, pendiente y longitud de la pendiente, y uso y manejo del suelo. Para aplicar este modelo se han elaborado tablas de cada uno de los factores para amplias zonas, en diversos países, pero es de anotar que la EUPS no permite interacciones no lineales entre los factores, hecho que es limitante, ya que las

relaciones entre los factores son no lineales. (Kirby y Morgan, 1984).

Es importante también analizar el papel del impacto de las gotas de lluvia y el del flujo superficial; investigar su relación aclara mucho el proceso erosivo.

Es conocido el efecto compactador de las gotas de lluvia con la consiguiente reducción de la infiltración y el incremento del flujo superficial, como también el efecto de la cubierta vegetal como protectora del impacto causado por la energía cinética de las gotas de lluvia sobre el suelo. Igualmente, se reconoce la repercusión de la pendiente sobre la capacidad de transporte de un flujo superficial.

A pesar de lo que se sabe del fenómeno erosivo, no se tiene un conocimiento adecuado del movimiento directo del suelo removido por la salpicadura de las gotas de lluvia con relación al movimiento del flujo superficial, y no hay certeza por consiguiente sobre cuál es el balance y equilibrio relativo que puede existir entre la cantidad de partículas de suelo desprendidas y disponibles para ser transportadas y la capacidad de transporte (Kirby y Morgan, 1984).

El flujo superficial puede mostrar la tendencia que presenta la erosión, puesto que si el transporte brindado por el flujo superficial es parte importante del movimiento del suelo, los cambios del flujo superficial producirán cambios en las tasas de transporte del suelo.

También es sabido que el flujo superficial en un área pequeña y homogénea, en cuanto al suelo, cuando recibe una lluvia de determinada intensidad, se estima como la diferencia entre la intensidad pluvial y la tasa de infiltración, siempre y cuando la intensidad de la lluvia sea mayor a la tasa de infiltración.

La tasa de infiltración máxima se presenta al comienzo de la lluvia y depende más que todo de las características del suelo y de su estado de humedad inicial; luego, esta tasa de infiltración va disminuyendo a medida que cae la lluvia en el transcurso del tiempo. Esta situación ilustra que

no es lógico que el suelo transportado por el flujo superficial se exprese mediante una multiplicación del factor K de erosividad del suelo y del factor R de agresividad de la lluvia, como lo expresa la EUPS.

Con relación a lo anterior hay que tener en cuenta que existe un efecto sobre el escurrimiento superficial, determinado por las características del suelo y su humedad inicial, cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la tasa de infiltración, o por la precipitación total cuando la intensidad de la lluvia es menor que la tasa de infiltración.

Existe una interacción no lineal entre las gotas de lluvia y el transporte del flujo, pero se desconocen los detalles necesarios para cuantificar esta relación, lo cual no depende solamente de las propiedades de las partículas de suelo, sino también de las características de la rugosidad de la superficie, que afecta las condiciones medias del flujo y la distribución de sus profundidades a lo largo de la pendiente del terreno (Kirkby y Morgan, 1984).

Para hacer una aplicación adecuada de la EUPS en diferentes zonas de Colombia, varios investigadores han trabajado en el ajuste y calibración de los factores involucrados (Vega, 1988; García y Castro, 1998).

Los modelos estocásticos se implementan para obtener mayor cantidad de datos de eventos, a partir de una serie histórica conocida de ellos. Se pueden usar para hacer la predicción de la producción de sedimentos (Woolhiser y Todorovic, 1971). Los datos de precipitación y caudal pueden hallarse estocásticamente para luego aplicar una ecuación de producción de sedimentos. Estos modelos se pueden utilizar más que todo en cuencas exorréicas y no en parcelas de suelos de ladera, donde los modelos basados físicamente tienen mayor aplicabilidad (Morgan, 1997).

Para concebir un buen modelo predictivo de la erosión hídrica basado físicamente, es necesario tener en cuenta algunos criterios fundamentales entre los cuales está el observar y estudiar más detalladamente los procesos de mayor influencia en la cuantificación del fenómeno.

Otro criterio a tener en cuenta es la escala de validez. Si el modelo es correcto, deberá tener validez en toda el área y no solo en parte de ella, y, para lograrlo se deberán incluir en el modelo todos los parámetros relevantes para el área total.

Finalmente, se deben tener en cuenta las restricciones, las cuales se refieren principalmente a la conservación de la masa, para el sedimento y el agua, y respecto a los límites adecuados en los bordes de la parcela, el cambio de la pendiente y la base de la pendiente.

Para modelos basados físicamente, sobre erosión hídrica en suelos de ladera, se ha fijado la atención en las tasas de transporte de suelo, la capacidad de desprendimiento por flujo superficial, y la interacción entre la capacidad de desprendimiento y la capacidad de transporte para estimar el transporte real y la tasa de erosión. Otro aspecto que está cobrando interés es la interacción entre la formación de pequeñas corrientes de agua y los procesos entre ellas.

Los modelos más recientes se basan implícita o explícitamente en la siguiente expresión, para la estimación de la erosión a corto o largo plazo, en suelos de pendiente lateralmente uniforme:

$$\frac{ds}{dx} + \frac{dz}{dt} = A$$

En donde:

s = Tasa actual de transportar sedimentos (pendiente transversal promedio)

x = Distancia horizontal a partir del borde superior de la parcela.

z = Nivel topográfico a través de la pendiente

t = Tiempo transcurrido

A = Tasa media de incremento externo de sedimentos, a través de la pendiente

$\frac{ds}{dx}$  = Variación de la tasa actual de transporte de sedimentos a lo largo de la proyección horizontal de la parcela.

$\frac{dz}{dt}$  = Tasa de disminución de la superficie del suelo de la parcela.

Esta ecuación considera que la densidad del suelo no cambia. Cuando se aplica a procesos individuales, debe incluir todas las transferencias entre procesos, y cuando se aplica a todos los procesos juntos, deberá obtenerse normalmente una tasa de adición de cero. La ecuación ha sido empleada por Meyer y Wischmeier (1969), Coling (1963), Young (1963), y otros, y ha sido plenamente aceptada. (Morgan, 1997).

## CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio está situada en la parte central del departamento de Cundinamarca, al suroeste de Bogotá, en la vereda Balsillas del municipio de Mosquera, entre las coordenadas geográficas 4° 30' y 5° 00' longitud Norte, y entre los 74° 10' y 74° 21' latitud Oeste, según el meridiano de Greenwich.

Su altura promedio es de unos 2.600 msnm. La zona es de montañas tropicales con temperatura media durante el año que fluctúa entre 12 °C y 14 °C con poca variación entre los meses, pero con mucha fluctuación entre los ciclos de 24 horas, variando de menos de 0 °C por la noche hasta más de 20 °C en el día, durante las épocas secas.

Se presenta un régimen de lluvias bimodal, siendo los períodos húmedos los comprendidos entre los meses de marzo a mayo y octubre a noviembre; y los períodos secos entre los meses de diciembre a febrero y junio a septiembre. En los últimos años han presentado alteraciones debido a procesos atmosféricos como el fenómeno del Niño.

La zona pertenece a la cuenca hidrográfica del río Bojacá. Según el mapa ecológico de Colombia derivado de Holdridge existen en la región de Mosquera dos zonas ecológicas: una zona de bos-

que húmedo Montano Bajo, bh-MB, donde el bosque primario (*Cordia* sp, *Escallonia* sp y *Clusia* sp) ha sido destruido y reemplazado por pinos, eucaliptos, pastos y cultivos como cebada, trigo y hortalizas; y una zona de bosque seco Montano Bajo, bs-MB. Remanentes del bosque primario podrían ser: *Cordia* sp, *Solanum* sp, *Fourcraea* sp, *Opuntia* sp, entre otras.

La geología de la región de Mosquera, que forma el límite suroccidental de la sabana de Bogotá, se compone principalmente de rocas areniscas de la formación Guadalupe. Las distintas fases, que tienen su propia expresión en el paisaje, son areniscas duras, formación plaeners, formación areniscas del Labor y formación arenisca tierra.

Con base en los ensayos de laboratorio se llegó a un grado de detalle que permite hacer la caracterización de los suelos en cada una de las parcelas de escorrentía. En las parcelas experimentales los suelos son de color habano, de textura arenosa y franco arenosa, con contenido de materia orgánica entre 1,6% y 4,5%, y una granulometría con predominio de partículas menores a 1 mm, en un 45% a 92% en la mayoría de las 24 parcelas establecidas.

## METODOLOGÍA

La experimentación se inició con la selección de dos sitios representativos de la zona de estudio, que obedeció a criterios de cobertura, suelos y pendientes del terreno.

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar (Johnson y Wichern, 1982) con un arreglo factorial de 3 x 2, con 4 repeticiones donde se dispone de 24 parcelas de 100 m<sup>2</sup>, con dimensiones de 20 x 5 m<sup>2</sup>, distribuidas en 2 rangos de pendiente y 3 tratamientos (Tabla 1).



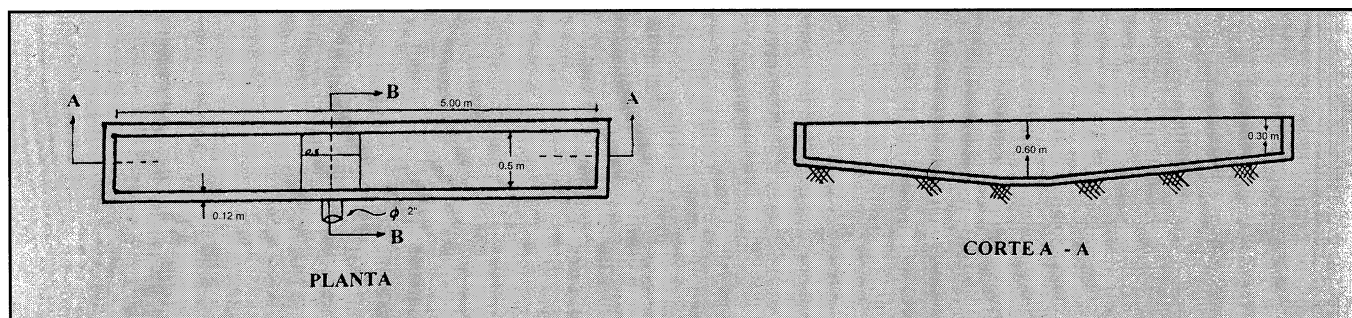
**Tabla 1.** Distribución de las parcelas de escorrentía según diseño experimental.

No. PARCELAS	TIPO COBERTURA	PENDIENTE (%)
1-4	Forestal <sup>1</sup>	40-50
5-8	Forestal <sup>1</sup>	15-25
9-12	Rastrojos <sup>2</sup>	40-50
13-16	Rastrojos <sup>2</sup>	15-25
17-20	Suelo desnudo	40-50
21-24	Suelo desnudo	15-25

<sup>1</sup> Eucalipto (*Eucaliptus globulus*) y piño (*Pinus patula*)<sup>2</sup>. Gurrubo (*Solanum lyciodes*), lulo de perro (*Solanum macranta*) y cactus (*Opuntia schumani*).

En cada una de las parcelas se delimitó el área con láminas de zinc, y con canal de desviación en la parte superior, y se establecieron estructuras de medición consistentes en una canal revestido en concreto en la parte inferior de la parcela, donde se retuvieron los sedimentos arrastra-

dos por el agua de escorrentía del agua lluvia. Los sedimentos en suspensión y el volumen de agua de escorrentía se almacenaron en un tanque de 15 galones colocado en la parte media del canal, donde confluyeron sus pendientes laterales (Figura 1).



**Figura 1.** Canal recolector tipo.

Las pérdidas de suelo por salpicadura se midieron con recipientes de 7 centímetros de diámetro y 5 de profundidad, en número de 4, colocados aleatoriamente en cada parcela.

Semanalmente se realizó la toma de información de sedimentos de fondo en cada canal, volumen de escorrentía, sedimentos en suspensión mediante filtrado, y pérdidas de suelo por salpicadura captados por los recipientes.

La precipitación se midió con tres pluviómetros de dimensiones semejantes a los estandarizados por la Organización Meteorológica Mundial, ins-

talados en sitios representativos para cada tipo de cobertura, y con los registros pluviográficos de los pluviómetros controlados por el Instituto de Investigaciones y Estudios Ambientales (Ideam), que se encuentran en sitios cercanos a los ensayos. Se estimó, mediante correlaciones, la intensidad de las lluvias.

La confiabilidad de la información se evaluó teniendo en cuenta que las variables de erosión en la zona de estudio son principalmente la cobertura y la pendiente. Mediante un análisis de varianza (Johnson y Wichern, 1982), se determi-

nó la existencia de diferencias significativas entre tratamientos y grados de pendiente. La eficacia de los tratamientos se determinó por comparación frente a las parcelas testigo (suelo desnudo).

Del análisis anterior se definieron las variables que más influyeron en la estimación de las pérdidas de suelo, y con base en ello se buscó establecer la relación existente entre ellas, para lo cual se seleccionaron tres modelos, con los cuales se compararon sus resultados frente a las pérdidas de suelo observadas experimentalmente.

Se tuvieron en cuenta los modelos de la EUPS, Modelo Predictivo de Pérdidas de Suelo para el Sudeste de África y el Modelo de Morgan, Morgan & Finney, con los cuales se obtuvo la cuantificación de las pérdidas de suelo para el período de experimentación que fue desde julio de 1999 a abril de 2000.

La EUPS se define como:

$$AS = R * K * L * S * C * P$$

Donde:

R = Factor de erosividad pluvial para el periodo  
 $= E_c (J/m^2) * I_{30} (mm/h) / 1000$

$E_c$  = Energía cinética de la lluvia en el período considerado ( $J/m^2$ ). Se calcula, según Wischmeier, como:

$$E_c = 8,95 + (8,44 * \text{Log} (I_{30}))$$

$I_{30}$  = Intensidad máxima de la lluvia en el período considerado (mm/h)

Cuando se consideran varios períodos, el valor a utilizar es la suma de los R para tener en cuenta todos los períodos, y así estimar las pérdidas de suelo en ese lapso de tiempo. Se suele hacer sobre una base anual.

K = Factor de erosionabilidad del suelo. Considera la textura, granulometría y porcentaje de materia orgánica (ton/ha)

L = Factor de longitud de la pendiente del terreno (adimensional)

S = Factor del grado de la pendiente (adimensional)

C = Factor de manejo de la cobertura vegetal (adimensional)

P = Factor de prácticas de manejo para el control de la erosión (adimensional)

AS = Pérdidas de suelo para el lapso de tiempo para el cual se estimó el factor R, en (ton/ha/año).

El modelo Predictivo de Pérdidas de Suelo para el Sudeste de África, llamado SLEMSA, fue desarrollado en Zimbabwe para determinar las medidas adecuadas de conservación de suelos. La ecuación es:  $Z = K * X * C$

Donde:

Z = Pérdida media anual de suelo (ton/ha/año)

K = pérdida media anual de suelo para la parcela tipo (ton/ha/año)

X = Factor de longitud y pendiente (adimensional)

C = Factor manejo de la cobertura vegetal (adimensional)

El factor K se calcula para una parcela tipo de 20 m de longitud por 5 m de anchura de un suelo de erosionabilidad conocida (F) de acuerdo con la textura del suelo, presentado por Morgan (1997) y la siguiente ecuación:

$$\text{Ln } K = b * \text{Ln } E_c + a$$

$$a = 2.884 - 8.2109 * F$$

$$b = 0.4681 + 0.7663 * F$$

donde:

$E_c$  = Energía cinética de la lluvia, según  
Wischmeier

$$E_t = \sum E_c \text{ (J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}\text{)}$$

$$X^* = \left( \frac{L}{22.13} \right)^{0.5} (4.5979 + 0.1929S - 0.1645S^2)$$

Esta es la ecuación del factor LS según Wischmeier, donde S es la pendiente en porcentaje.

$$C = \frac{2.3 - 0.01 * I}{30}$$

Donde I = % de lluvia con respecto a la anual \*  
% de cobertura vegetal

El modelo de Morgan & Finney (1984) fue concebido para incluir en él los avances hechos en el conocimiento de los procesos de erosión en parcelas de escorrentía en laderas. En él se considera una fase hidráulica y una de sedimentación. En

esta última no considera el transporte por salpicadura ni el desprendimiento por escorrentía, sino únicamente el desprendimiento de partículas por el impacto de las gotas de lluvia y el transporte de las mismas por flujo superficial.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se pudo establecer, de acuerdo con la experimentación realizada, que los sedimentos recuperados en las parcelas no solo eran causados por las lluvias, sino que el viento también incidió en el proceso, dadas las características de los suelos, en los cuales predomina el material volcánico (actosuelos), y suelos y sedimentos provenientes de piroclastos, de relativa estabilidad en superficie, susceptibles a la acción eólica. Esto mismo causó dificultades en la obtención de las pérdidas de suelo por salpicadura.

Los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza permitieron establecer que la cobertura y la pendiente son las variables más determinantes de las pérdidas de suelo en la zona de estudio (Tablas 2-5).

Tabla 2. Valores medios y totales de las pérdidas de suelo según la cobertura (Kg/ha/año)

	COBERTURA ARBOREA	COBERTURA RASTROJO	SUELO DESNUDO	TOTAL	MEDIA
PENDIENTE ALTA	369.15	576.45	4106.75		
	275.41	734.77	5555.46	24964.25	2080.38
	477.14	677.59	8747.57		
	428.77	699.56	2315.63		
PENDIENTE BAJA	306.54	244.94	3555.95		
	246.78	292.2	3382.97	15616.25	1301.35
	703.65	182.79	2992.19		
TOTAL MEDIA	447.14	195.24	3065.86		
	3254.58	3603.54	33722.38	40580.5	
	406.82	450.44	4215.30		1690.86
<b>TOTALES</b>					
PENDIENTE ALTA	1550,47	2688,37	20725,41	24964,25	
PENDIENTE BAJA	1704,11	915,17	12996,97	15616,25	
TOTAL	3254,58	3603,54	33722,38	40580,5	



**Tabla 3.** Análisis de varianza por cobertura.

FUENTE DE VARIACION	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	Fc	Fo	
					99%	95%
PENDIENTE	3641045.99	1	3641045.99	0.7524	8.29	4.41
COBERTURA	76481380.54	2	38240690.27	7.6188	6.01	3.55
INTERACCION	4221032.54	2	2110516.27	0.4205	6.01	3.55
ERROR	90346107.43	18	5019228.19			
TOTAL	106948066.60	23				

La importancia de la pendiente y la cobertura vegetal en los resultados de las pérdidas de suelo se explica por el aumento significativo que estas tienen al incrementarse la pendiente o desprotegerse el suelo. En cuanto a la pendiente, un aumento de ella del 20% al 40% conlleva un incremento de las pérdidas de suelo observadas de 13 a 21 ton/ha/año, o sea un 62% más, aunque este efecto se atenúa cuando las coberturas son de rastrojo o arbórea (Tabla 4).

El efecto de la cobertura es evidente al examinar la Tabla 2, donde la cobertura arbórea reduce las pérdidas de suelo observadas de 21 a 1,6 ton/ha/año en las altas pendientes (40%), o sea en 92%, y en las bajas pendientes (20%) en 90%, lo cual demuestra la gran influencia del bosque sobre las pérdidas de suelo en Sabrinski.

**Tabla 4.** Valores medios y totales de las pérdidas de suelo según la pendiente (kg/ha/año)

	PENDIENTE ALTA	PENDIENTE BAJA	TOTAL	MEDIA	
COBERTURA ARBOREA	369,15 275,41	477,14 428,77	306,54 246,78	703,65 447,14	3254,58 406,82
COBERTURA RASTROJO	576,45 734,77	677,59 699,56	244,94 292,2	182,79 195,24	3603,54 450,44
SUELO DESNUDO	4106,75 5555,46	8747,57 2315,63	3555,95 3382,97	2992,19 3065,86	33722,38 4215,30
TOTAL	24964,25		15616,25		40580,5
MEDIA	2080,35		1301,35		1690,86
<b>TOTALES</b>					
COBERTURA ARBOREA	1550,47		1704,11		3254,58
COBERTURA RASTROJO	2688,37		915,17		3603,54
SUELO DESNUDO	20725,41		12996,97		33722,38
TOTAL	24964,25		15616,25		40580,5

Tabla 5. Análisis de varianza para pendiente

FUENTE DE VARIACION	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	Fc	Fo	
					99%	95%
COBERTURA	76481380,54	2	38240690,3	30,451	6,01	3,55
PENDIENTE	3641045,99	1	3641045,99	2,89936	8,29	4,41
INTERACCION	4221032,54	2	2110516,27	1,6806	6,01	3,55
ERROR	22604607,53	18	1255811,53			
TOTAL	106948066,60	23				

Las pérdidas de suelo calculadas con la EUPS fueron de 80,88 ton/ha/año frente a 40,58 ton/ha/año observadas para un período de un año, a pesar de que se tuvo en cuenta el ajuste del factor S de la EUPS de García y Castro (1998).

La sobreestimación de las pérdidas de suelo calculadas con la EUPS ajustada, frente a las pérdidas de suelo observadas (PSO), se puede explicar por el efecto no muy significativo de las lluvias sobre la erosión del suelo en la zona en estudio.

Aunque, según el modelo SLEMSA original, las pérdidas de suelo totales fueron de 631.77 ton/ha/año y este cálculo se aparta en forma importante de las experimentales, siguen las tendencias del comportamiento observado, en cuanto a que para las pendientes del 40% al 50% marcan diferencias importantes frente a las pendientes del 15% a 25%.

Con el modelo de Morgan, Morgan y Finney, se obtuvieron pérdidas de suelo de 14443,36 ton/ha/año, que sobrevaloran considerablemente las PSO.

De acuerdo con los resultados y la labor desarrollada para obtenerlos, se llegó a determinar un modelo más representativo del proceso erosivo en Sabrinski con el modelo Slemsa, ya que permitió mediante un ajuste del factor f(S), que es el la pendiente, encontrar unos valores de las pérdidas de suelo con un 66,6% de aproximación a las PSO.

Este resultado se halló mediante una regresión de tipo cuadrático para el factor de la pendiente, luego de haber ensayado diversas regresiones como la lineal simple, considerando solo la pendiente frente al factor de la pendiente, y la lineal múlti-

ple teniendo en cuenta la longitud y la pendiente para el factor  $X^* = f(S) * f(L)$

Donde el factor X ajustado, notado como  $X^*$ , se obtuvo como:

$$X^* = \frac{PSO}{ZKC}$$

La ecuación de ajuste del factor de la pendiente para el modelo SLEMSA en la zona de Sabrinski es:

$$f(S) = 4.5979 + 0.1929S - 0.1645s^2$$

Con un coeficiente de correlación  $r = 66,6\%$

Para el factor de la longitud de la pendiente «f(L) se mantuvo la propuesta por Wischmeier que es:

$$f(L) = \left( \frac{L}{22.13} \right)^{0.5}$$

donde L es la longitud de la ladera en metros.

De acuerdo con el modelo SLEMSA ajustado a la zona en estudio, las pérdidas de suelo totales de las parcelas de escorrentía fueron de 48.9940 ton/ha/año.

En la Tabla 6 se resumen los resultados de la aplicación del modelo ajustado con las pérdidas de suelo calculadas (PSC) en comparación con las (PSO).

**Tabla 6.** Resumen de las pérdidas de suelo calculadas con el modelo Slemsa ajustado frente a las observadas.

PARCELA	K	X	C	PSC (ton/ha)	PSO (ton/ha)
1	3.1032	2.1717	0,0722	0,4865	0,3691
2	3.1032	2.0619	0,0719	0,4598	0,3254
3	3.1032	1.9656	0,0733	0,4470	0,4271
4	3.1032	1.9656	0,0731	0,4460	0,4288
5	3.1032	1.3070	0,0710	0,2879	0,4065
6	3.1032	1.3070	0,0710	0,2881	0,3468
7	3.1032	1.3070	0,0721	0,2924	0,5036
8	3.1032	1.3070	0,0728	0,2951	0,4471
9	3.1032	2.0619	0,0717	0,4588	0,5765
10	3.1032	2.0619	0,0710	0,4544	0,7348
11	3.1032	2.0619	0,0712	0,4556	0,6776
12	3.1032	2.0619	0,0715	0,4576	0,6996
13	3.1032	1.4939	0,0762	0,3531	0,2449
14	3.1032	1.4939	0,0762	0,3531	0,2922
15	3.1032	1.4939	0,0762	0,3531	0,1828
16	3.1032	1.4939	0,0762	0,3531	0,1952
17	3.1032	2.0160	1,0000	6,2560	4,1067
18	3.1032	2.0160	1,0000	6,2560	5,5555
19	3.1032	1.9251	1,0000	5,9739	5,7476
20	3.1032	1.9622	1,0000	6,0890	5,3156
21	3.1032	1.4121	1,0000	4,3819	3,5559
22	3.1032	1.4121	1,0000	4,3819	3,3830
23	3.1032	1.5168	1,0000	4,7068	2,9922
24	3.1032	1.5168	1,0000	4,7068	3,0659
<b>TOTAL</b>				<b>48,9940</b>	<b>40,5805</b>

## CONCLUSIONES

- \* Las variables más importantes que influyen en el proceso de erosión en Sabrinski son la pendiente y la cobertura vegetal. Con la variación de estos factores se presentan grandes diferencias en las pérdidas de suelo (Tabla 2).
- \* El modelo predictivo que mejor representa el comportamiento de la erosión en la zona en estudio es el de SLEMSA, con ajuste en su factor de la pendiente, quedando definido así:

$$X^* = \left( \frac{L}{22.13} \right)^{0.5} (4.5979 + 0.1929S - 0.1645S^2)$$

- \* Esta ecuación presenta la misma forma de la ecuación original, lo que permite pensar que el modelo SLEMSA es estructuralmente válido

para aplicarlo en la zona, con el reajuste del factor X original.

- \* El grado de correlación obtenido fue del 66,6%, lo cual permite tener un nivel aceptable de confiabilidad en la aplicación de ajuste realizado, dentro de las aproximaciones con que se pudo obtener la información experimental de campo.

## RECOMENDACIONES

- \* Continuar con la toma de información en el área de Sabrinski para recopilar información por un mayor período de tiempo y así corroborar los resultados obtenidos en este trabajo.
- \* Es aconsejable la instalación de un pluviógrafo en el área experimental que permita obtener información de las intensidades de las precipitaciones que ocurran allí. Con estos datos se

obtendría mayor confiabilidad en el cálculo de la energía cinética de la lluvia, indispensable para determinar el factor R de la EUPS y el factor K del modelo SLEMSA.

\* Instalar un anemocinómetro que capte información acerca de la velocidad, recorrido y dirección del viento para estimar la erosión eólica del área, puesto que este es un factor de incidencia en la pérdida de suelo que allí se observa.

\* Iniciar el proyecto de recuperación de suelos en las zonas donde se hizo y se está haciendo la explotación de areniscas. Es importante reponer la cobertura vegetal para reducir la acción erosiva del viento. En el área de la hacienda Vista Hermosa se requiere reforzar el control de la erosión con obras de conservación como los trinchos, para evitar que siga aumentando el tamaño de la cárcava que se está formando.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**CULLING, W.E.H.** 1963. Soil creeps and the development of hillside slopes, *J. Geology*.

**FERNÁNDEZ DE ANDRADE, L.** 1995. Evaluación del riesgo de erosión por salpique, Caracas, Venezuela, Consejo de Desarrollo Humanístico y Científico, Universidad Central de Venezuela.

**FLAXMAN, E.M.** 1972. «Predicting Sediment Yield in the Western United States», *J Hydraulics Div. Am. Soc. Civil Engrs.*

**JOHNSON, R.A. Y D. WICHERN** 1982. *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Nueva Jersey, Estados Unidos.

**GARCÍA OLMOS, C.** 1994. «Análisis de la información de pérdidas de suelo en parcelas de escorrentía», en: *Revista Colombia Forestal*, Vol. 4, No. 8, Nueva Época, págs. 29-37.

**GARCÍA OLMOS, C. Y L. CASTRO** 1998. «Ajuste de los factores de longitud y pendiente de la ecuación universal de pérdida de suelo en la cuenca del río Combeima, Municipio de Ibagué, Colombia», en: *Revista Colombia Forestal*, Vol.

5, No.11, Nueva Época, págs. 139 - 148.

**KIRKBY, M.J. Y MORGAN, R.P.C.** 1984. *Erosión de Suelos*, Editorial Limusa, México.

**LECARPENTIER, A.** 1977. *Estudio de Suelos de Colombia*, Inderena, Bogotá.

**MEEUWING, R.O.** 1970, «Sheet Erosión on Intermountain Summer Ranges», Forest Service, Research paper, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Washington, D.C.

**MEYER, L. D. Y W. H. WISCHMEIER** 1969. «Mathematical Simulation of the Process of soil Erosion by Water», *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 12.

**MORGAN, R.P.C.** 1997. *Erosión y Conservación del Suelo*, Ediciones Mundiprensa, Madrid.

**THORNES, J.B.** 1980. «Erosional process of running water and their spatial and temporal controls; a theoretical viewpoint», en M. J. Kirkby y R.P.C. Morgan (eds), *Soil erosion*, Chichester, Wiley.

**VEGA MORA, L.** 1988. Ajuste y calibración de la ecuación universal de pérdidas de suelo, Instituto Nacional de los Recursos Naturales y del Ambiente, Inderena, Proyecto Cuenca Alto Magdalena.

**WISCHMEIER, W.H.** 1960. «Cropping management factor evaluation for a universal soil-loss equation», *Proc. Soil. Sci. Soc. Am.*

**WISCHMEIER, W.H. y D.D. SMITH** 1965. «Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains», *Agriculture Handbook*, No. 282, Departamento de Agricultura de Estados Unidos, Washington, D.C.

**WOOHISER, D.A. y P. TODOROVIC** 1971. «A stochastic model of sediment yield for ephemeral streams proc», *Usda Int. Assoc. For statistical hydrology (miscellaneous publication No. 12750*, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Washington, D. C.

**YOUNG, A.** 1963. *Deductive models of slope evolution*, *Nach Akad Wissen Gottinngen*.