



Agronomía Costarricense
ISSN: 0377-9424
rac.cia@ucr.ac.cr
Universidad de Costa Rica
Costa Rica

Lianes, Elena; Marchamalo, Miguel; Roldán, Margarita
EVALUACIÓN DEL FACTOR C DE LA RUSLE PARA EL MANEJO DE COBERTURAS VEGETALES
EN EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO BIRRÍS, COSTA RICA
Agronomía Costarricense, vol. 33, núm. 2, 2009, pp. 217-235
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43613279007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

EVALUACIÓN DEL FACTOR C DE LA RUSLE PARA EL MANEJO DE COBERTURAS VEGETALES EN EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO BIRRÍS, COSTA RICA¹

Elena Lianes^{2/}, Miguel Marchamalo^{**}, Margarita Roldán^{*}*

Palabras clave: Factor C, modelo RUSLE, cobertura vegetal, erosión, capacidad de uso de la tierra.

Keywords: C factor, RUSLE model, vegetation cover, erosion, land capability.

Recibido: 12/05/09

Aceptado: 09/08/09

RESUMEN

Este trabajo contribuye al incremento del conocimiento sobre las relaciones cobertura vegetal y erosión hídrica. Se determina la capacidad de uso de la tierra según MAG y MIRENEM, y el factor C de RUSLE. La capacidad de uso de la tierra de las parcelas es de las Clases V y VI, en una pendiente de 21% y 79%, respectivamente. Sólo el 21% de las parcelas presenta un uso adecuado, correspondiendo con las parcelas de arbolado, pasto de corta y potrero en pastoreo normal. El factor C calculado, como es esperable, varía de forma considerable entre las cubiertas agrícolas $C=(0,3-0,4)$, y el resto de cubiertas vegetales $C=(0,002-0,04)$. Los factores C agrícolas presentan valores menores que los tabulados para la región, empleados en otros estudios, lo cual parece indicar que se ha corregido parte de la sobreestimación de las pérdidas de suelo de tierras agrícolas señalada en estudios previos. Para corregir el conflicto de uso de la tierra y disminuir la erosión se recomienda aplicar planes de manejo integrado que implementen prácticas para la conservación de suelos y aguas, considerando las propuestas de cubiertas vegetales que ofrecen mejor protección al suelo según los resultados de este trabajo.

ABSTRACT

RUSLE factor C evaluation for the vegetation cover management in erosion control in the Birris river basin, Costa Rica. This work contributes to increase the knowledge about the relations between vegetation cover and water erosion. Land-use capability was determined according to MAG and MIRENEM and RUSLE C factor. The land-use capability of the plots consists of Classes V and VI, representing slopes of a 21% and 79%, respectively, slope being a main limitation. Only 21% of the plots showed an appropriate land use, which corresponds with forest, cutting pastures and pasture under a normal level of grazing. The calculated C factor, as expected, varies considerably between agricultural covers $C=(0.3-0.4)$, and other vegetation covers $C=(0.002-0.04)$. Agricultural C factors have lower values than those used in previous studies in the same basin; which seems to indicate that some of the overestimation of agricultural soil loss rates from previous studies has been corrected. To correct the land use conflict and decrease erosion, the implementation of integrated management practices for soil and water conservation is recommended, taking into account the vegetation cover proposals that better protect the soil, on the basis of the results of the present work.

1. Parte del trabajo final de graduación de la primera autora para optar por el título de Ingeniera Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
2. Autora para correspondencia. Correo electrónico: elr@alumnos.upm.es

* Departamento de Ingeniería Forestal. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
** Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la región centroamericana se enfrenta al reto de producir alimentos, agua y energía de forma sostenible para una población creciente. Los esquemas de pago por servicios ambientales (PSA) ofrecen una oportunidad para regular estos procesos incentivando la producción de servicios ambientales y asegurando la satisfacción de la demanda de bienes básicos en cuencas prioritarias. En los últimos años se le ha asignado al recurso agua la importancia debida, por su alto valor ecológico y económico. En Costa Rica, el recurso hídrico, antes considerado abundante, puede llegar a escasear, especialmente al final de la época seca (ICE 1999). A finales de abril de 2007 el país entero sufrió un apagón y una semana de cortes por falta de agua para la generación hidroeléctrica (Ávalos 2007).

Un factor fundamental para la producción de agua de calidad y cantidad para la generación de energía eléctrica, es el uso del suelo en las partes altas de las cuencas (Robledo 2003). Diferentes estudios (Bruijnzeel 1990, Stadtmüller 1994 citados por Robledo 2003) concluyeron que la cobertura arbórea representa el uso más adecuado para la generación de este servicio ambiental. El sobreuso del suelo en áreas de ladera representa un factor que incide en el incremento de la erosión y en el transporte de suelo hacia los embalses, lo cual disminuye la capacidad de generación de energía eléctrica. Esta condición incrementa los costos de mantenimiento de las plantas hidroeléctricas y disminuye la vida útil de los equipos y los embalses (Gutiérrez 2001).

La sustitución del uso forestal por el uso agrícola puede tener un impacto negativo sobre el ciclo hidrológico. Estos cambios en la hidrología se relacionan principalmente con la calidad del agua, que tiene que ver con la erosión, la sedimentación y el flujo de nutrientes y con la cantidad de agua, relacionada con los flujos estacionales y la protección contra inundaciones (Lovón 2003).

Ramírez et al. (2008), han señalado que en zonas de elevadas pendientes y alta pluviosidad, como es el caso de la mayor parte de

Centroamérica, hay otros factores influyentes en la generación de sedimentos además de las prácticas agrícolas, como son, en orden descendente de importancia: los deslizamientos, las extracciones de áridos y canteras y el drenaje deficiente de los caminos e infraestructura vial. Así, según estos autores, en la cuenca del río Reventado, adyacente a la de estudio, además de las prácticas agrícolas inadecuadas, la deforestación, la climatología y la orografía, los principales agentes erosivos son: (1) los deslizamientos, que producen aportes de sedimentos de gran magnitud (Gómez 2002, Marchamalo 2004); (2) el deficiente control de torrentes y erosión en las vías terrestres, que promueve la erosión de taludes y la formación de zanjas en las márgenes de los caminos (MINAE 1996); y (3) agentes biológicos como las taltuzas (*Orthogeomys heterodus*), roedores que ocasionan daños a las obras de conservación de suelos e infraestructura de regadío.

La importancia económica de la cuenca del río Birrís para el país reside tanto en su producción agrícola y ganadera como en la producción de hidroelectricidad. En ella se produce el 60% de la papa de Costa Rica, alcanzando con sus sistemas agropecuarios una productividad financiera de 1.780 US\$ ha.año⁻¹, la mayor de la cuenca del Río Reventazón (ICE 1999). Es una cuenca tributaria de los Complejos Hidroeléctricos operados por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la Junta Administrativa de Servicios Eléctricos de Cartago (JASEC), empresas públicas de servicios costarricenses.

La erosión de la cuenca del río Birrís ha sido estimada por varios estudios, presentando en todos los casos valores promedio elevados, próximos a 50 t.ha⁻¹.año⁻¹ (ICE 1999, CATIE 2003, Marchamalo 2004 y 2007). En el estudio de diagnóstico del Plan Integral de Manejo de la Cuenca del Río Reventazón (ICE 1999) la aplicación del modelo USLE con el software CALSITE estimó una tasa media de erosión de 50 t.ha⁻¹.año⁻¹ y una tasa media de aporte de sedimentos de 38 t.ha⁻¹.año⁻¹ para la cuenca del Birrís. La cuenca del río Birrís según este estudio, aportaría el 16% de los sedimentos cubriendo solamente el

5% de la superficie de la cuenca del Reventazón. Es la subcuenca que tiene la tasa de erosión más alta de la cuenca, de acuerdo con los resultados obtenidos en el citado estudio (ICE 1999).

Debido al carácter prioritario para el país de la cuenca del río Birris se han llevado a cabo estudios sobre las tasas de erosión y sedimentación ya que sus altos valores afectan tanto a la producción hidroeléctrica como a la agricultura y ganadería. Sin embargo, no hay estudios específicos sobre el papel de la cobertura vegetal y su influencia en ese proceso. Por esta razón, este estudio se centra en la función de la cobertura vegetal en los procesos erosivos en la cuenca del río Birris, ya que es el elemento natural de protección del suelo contra la erosión y que se puede modificar en un periodo relativamente corto mediante la gestión del territorio. Esta información puede ser empleada para estimar los valores de la erosión potencial y producción de sedimentos, en distintos escenarios de uso de la tierra, evaluando el efecto de diversas medidas de conservación de suelos y aguas.

Los objetivos de este trabajo fueron: (1) determinar la capacidad de uso de la tierra y analizar el conflicto entre la capacidad de uso de la tierra y el uso actual en la cuenca de estudio; (2) calcular el factor C del modelo RUSLE mediante la caracterización y medición en campo de los tipos de cobertura vegetal de la cuenca de estudio y según la formulación original de RUSLE. A partir de los resultados de ambos objetivos, se proponen alternativas para el manejo de las cubiertas vegetales más eficaces para la protección del suelo contra la erosión.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca del río Birris pertenece a la cuenca alta del río Reventazón, que desemboca en el Caribe de Costa Rica (Figura 1). Está ubicada en la provincia de Cartago, abarcando parte de los cantones de Alvarado, Oreamuno y Paraíso, siendo Pacayas el centro poblacional más importante, entre las coordenadas geográficas de 83° 78' a 83° 86' de longitud Oeste y entre 9° 89'

a 9° 98' de latitud Norte. La cuenca comprende 4802 ha desde su nacimiento en el Cerro Noche Buena, en las faldas del Volcán Irazú (3432 msnm), hasta el embalse donde se encuentra la planta hidroeléctrica Birris III de la empresa hidroeléctrica JASEC (1245 msnm). El río Birris se caracteriza por una gran densidad de afluentes, siendo la quebrada Pacayas el principal. El área de influencia que abarca la cuenca de estudio está regida por condiciones climáticas de la Vertiente Atlántica con transición al clima del Valle Central. Presenta suelos de origen volcánico, clasificados como Andisoles (USDA 2003). La vegetación presenta diferencias marcadas en su distribución y estado a lo largo de la cuenca: en la zona alta existe mayor cobertura forestal (Figura 1), gracias a la declaración del Parque Nacional del Volcán Irazú y el Área de Conservación de la Cordillera Volcánica Central (ACCVC), no obstante, presenta algunos parches de bosques secundarios, charrales pastos y cultivos; en la zona media y baja de la cuenca la presencia de bosque se reduce a la cobertura mantenida en las nacientes y en la franja de ribera, donde la pendiente imposibilita el cultivo y el acceso del ganado, el resto de la superficie está cubierta por pastos y cultivos agrícolas (CATIE 2003).

El uso actual de la cuenca en porcentaje de superficie se reparte en bosque 28%, pastos 35% y cultivos 32% (Marchamalo 2004) (Figura 1). Los cultivos principales son papa, zanahoria, repollo, coliflor, y otras hortalizas, los cuales ocupan casi todo el territorio de la cuenca en fincas cuya extensión se encuentra en el rango de 5-20 ha.

Se muestrearon 20 parcelas, realizando 5 repeticiones en cada una, para un total de 100 puntos de muestreo. Se agruparon según los 3 tipos de uso de suelo o cobertura de la cuenca, con los siguientes subtipos: (a) cobertura arbórea: bosque natural, bosque degradado, frutal joven, frutal maduro; (b) cobertura con pastos: pasto de corta, potrero; (c) cobertura con cultivos: papa, zanahoria, brócoli, y repollo en 4 estados de crecimiento: (1) recién sembrado, (2) después de la aporca, (3) en plena cobertura, y (4)

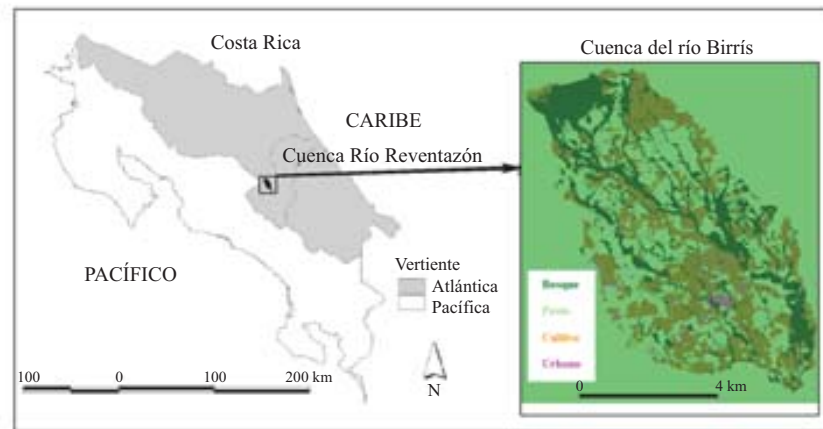


Fig. 1. Cuenca del río Birris: mapa de ubicación general en Costa Rica (izquierda); mapa de usos de la cuenca (derecha).

después de la cosecha. En determinadas rotaciones hay un periodo de descanso entre cultivos, que se asimila al estado después de la cosecha. Todas las parcelas tienen una pendiente media del 30-40%. Se comprobó la representatividad de las parcelas por comunicación personal con los gestores de la cuenca del Parque Nacional del Volcán Irazú del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) para cobertura boscosa; y de la Agencia de Servicios Agropecuarios de Pacayas del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) para las coberturas con frutales, pastos y cultivos.

En cada parcela se midieron las variables: (1) caracterización general y localización de las parcelas (uso actual y anterior, municipio, dueño y teléfono, croquis de localización, coordenadas geográficas y altitud con GPS, registro fotográfico); (2) edáficas y climáticas para determinar la capacidad de uso de la tierra (profundidad efectiva, pendiente, textura según Swisher (1999), erosión sufrida, pedregosidad, drenaje, riesgo de inundación, zona de vida, periodo seco, neblina, viento); (3) de la cobertura para el cálculo del factor C (fracción de la cubierta aérea, F_c , con densímetro forestal cóncavo o malla de 1x1 m, con cuadros de 0,10x0,10 m; altura efectiva, H, con

clinómetro o cinta métrica; fracción de la cubierta del suelo, S_p , con malla, rugosidad, con listón de 1 m, con divisiones cada 0,10 m y regla).

Con la información recogida se analizó el conflicto entre el uso actual y la capacidad de uso de la tierra en la cuenca, según la Metodología para la Determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras en Costa Rica (MAG y MIRENEM 1995). Primeramente se asignó una categoría de uso actual a cada parcela de acuerdo a esta metodología y seguidamente se determinó la capacidad de uso de la tierra, con lo que finalmente, se evaluó el conflicto de uso de la tierra.

La revisión de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), ha dado lugar a la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada (RUSLE), basándose en la actualización de los distintos factores que integraban la ecuación original y la aplicación de teorías más actuales sobre procesos de disgregación, transporte y sedimentación de las partículas arrancadas del suelo, ya sea por el impacto de las gotas de lluvia o por la escorrentía superficial, tanto laminar como en surcos.

La ecuación RUSLE (Renard et al. 1996) para la estimación de las pérdidas medias de

suelo como consecuencia de la erosión hídrica laminar y en surcos es la siguiente:

$$A = R * K * L * S * C * P, \text{ donde:}$$

A $\frac{t}{ha * año}$: pérdidas de suelo anuales/ud. superficie

R $\frac{hJul}{m^2} * \frac{cm}{h}$: factor erosividad de la lluvia

K $\frac{t}{ha} * \frac{m^2 * h}{hJul * cm}$: factor erodibilidad del suelo

L (adimensional): factor longitud de ladera

S (adimensional): factor pendiente

C (adimensional): factor vegetación

P (adimensional): factor de prácticas de conservación de suelo

La cobertura vegetal está representada en la ecuación por el factor vegetación o factor C. Este factor es muy significativo dentro de la ecuación USLE y el mapa de C generalmente hereda su configuración al mapa de erosión (Gómez 2002).

Para el cálculo del factor C, así como de los 5 subfactores de los que depende, se aplicó la formulación original del modelo RUSLE a partir del manual de Renard et al. (1996) y una hoja de cálculo de elaboración propia en lugar de la aplicación informática existente. Los subfactores de cubierta aérea, CC, rugosidad, SR, y cubierta en contacto con el suelo, SC, se calcularon con los datos de campo. Para los subfactores SR y SC la rugosidad de la superficie (R_u) se asimiló a la rugosidad aleatoria (R_a) determinada según la metodología descrita en Renard et al. (1996). Para el cálculo del subfactor SC el coeficiente empírico que indica la efectividad de la cubierta del suelo para reducir la erosión, b, se asignó según Renard et al. (1996), correspondiendo a las parcelas de cobertura agrícola un valor de 0,050 y un valor de 0,025 en las parcelas de pasto o arboladas. Se asignaron valores al subfactor de uso previo de la tierra, PLU a partir de las consideraciones de

Renard et al. (1996) y Kuenstler (1998), utilizado para parcelas con árboles como dosel principal 0,05, en parcelas con árboles como dosel complementario o con pasto 0,50, y en las parcelas con cultivos anuales 0,99.

En aquellos sistemas en los que las condiciones de la cubierta vegetal no cambien considerablemente a lo largo de un año como en los pastos extensivos, matorrales o terrenos forestales, los cálculos se simplifican respecto a cubiertas agrícolas, ya que los subfactores pueden ser calculados como promedios anuales; de esta manera el factor C se obtiene mediante la multiplicación directa de estos (Renard et al. 1996), equivalente a SLR.

Cuando la cubierta vegetal varía durante el año, como en cultivos agrícolas, el factor C se expresa como una media de las ratas de pérdida de suelo para cada intervalo de tiempo (SLR_i), ponderados con la erosividad acumulada del periodo (EL_i) (Renard et al. 1996). El intervalo de tiempo (i) para cada estado del cultivo varía según la rotación como se muestra en el cuadro 2. Los factores R fueron obtenidos a partir de datos facilitados por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), gracias a los cálculos realizados por Gómez (2007) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Erosividades de lluvia en la cuenca del río Birrís.

Mes	Erosividad de lluvia (R (%))	
	Sanatorio Durán (zona alta)	Cachí (zona baja)
Ene	1	8
Feb	3	2
Mar	1	3
Abr	1	3
May	22	13
Jun	17	16
Jul	6	10
Ago	6	12
Set	14	15
Oct	15	7
Nov	11	8
Dic	3	3

Este cálculo se ha aplicado a las parcelas agrícolas para las rotaciones actuales y alternativas propuestas en el futuro (Cuadro 2). En las rotaciones a futuro los periodos de descanso coinciden con los meses de mayor erosividad de la lluvia. Para su diseño, el orden de los cultivos se consultó a los responsables del Ministerio de Agricultura en la zona (B. Molina. Usos de la tierra en la cuenca del río Birris. MAG. Comunicación personal 2007). Dichas rotaciones tienen como objeto promover los estados del cultivo más protectores, con menor SLR, en los momentos más críticos, siendo compatibles con las preferencias de los productores de la zona.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis del conflicto entre el uso actual y potencial de la tierra en la cuenca del río Birris (Cuadro 3) refleja que el desarrollo de

la población se basa en una intensa producción agraria, como lo muestra el elevado porcentaje de la superficie de la cuenca destinado a estos usos, cercano al 68% (Marchamalo 2004, ICE 1999). Así mismo, en el mapa de usos de la tierra en la cuenca de estudio (Figura 1) se aprecia la expansión de los cultivos y de los pastos. El bosque está restringido a aquellas áreas donde el uso agropecuario es inviable: los espacios protegidos en la zona alta de la cuenca y la franja de ribera donde la pendiente imposibilita el cultivo y el acceso del ganado en el resto de la cuenca.

Del cuadro 3, se deduce que en el 90% de las parcelas medidas, la pendiente (e_p) es el factor que define la clase de capacidad de uso, y por tanto, el uso potencial (Figura 2). El gradiente de la pendiente y su longitud influye de forma directamente proporcional en la velocidad y en el volumen de agua de escorrentía, así como en su poder erosivo (Cubero 1996).

Cuadro 2. Rotaciones de los cultivos actuales y propuestas para el futuro en la cuenca del río Birris, Costa Rica, 2007.

	ROTACIONES (zona alta (>2500 msnm))						ROTACIONES (zona media-baja (<2500 msnm))							
	Actual			Propuesta			Actual				Propuesta			
	Cultivo		Estado	Cultivo		Estado	Cultivo			Estado	Cultivo			Estado
	PB	PZ		P-B	P-Z		PZP	PPB	PZB		PZP	PPB	PZB	
Enero (1/2)	P	P	1	B	Z	2	P	P	P	1	P	P	Z	4
Enero (1/2)	P	P	1	B	Z	2	P	P	P	1	P	P	P	1
Febrero	P	P	2	B	Z	3	P	P	P	2	P	P	P	2
Marzo	P	P	3	B	Z	3	P	P	P	3	P	P	P	3
Abril	P	P	3	B	Z	4	P	P	P	4	P	P	P	4
Mayo	P	P	4	B	Z	Ds	Z	P	Z	1	Z	B	B	1
Junio	P	P	Ds	B	Z	Ds	Z	P	Z	2	Z	B	B	2
Julio	B	Z	1	P	P	1	Z	P	Z	3	Z	B	B	3
Agosto	B	Z	2	P	P	2	Z	P	Z	4	Z	B	B	4
Setiembre	B	Z	3	P	P	3	P	B	B	1	Z	B	B	Ds
Octubre	B	Z	3	P	P	3	P	B	B	2	P	P	Z	1
Noviembre	B	Z	4	P	P	4	P	B	B	3	P	P	Z	2
Diciembre	B	Z	Ds	P	P	1	P	B	B	4	P	P	Z	3

Cultivo: P: papa; B: brócoli; Z: zanahoria.

Estado del cultivo: 1: recién sembrado; 2: después de la aporca; 3: cobertura plena; 4: después de la cosecha; Ds: descanso.

Cuadro 3. Clase y unidad de manejo de las parcelas.

Clase (uso potencial)	Unidad de manejo	Parcela muestreada (uso actual: a: adecuado; i: inadecuado sobreuso)
V (pasto)	V $e_{12}c_{13}$	potrero carga normal (a)
	V $e_{12}s_2c_{134}$	papa 1 (i)
	V $e_{12}s_{123}d_1c_{134}$	zanahoria 2 (i)
	V $e_{12}c_{134}$	brócoli 4 (i)
VI (cultivo permanente)	VI $e_{12}s_2d_1c_{134}$	bosque degradado (i)
	VI $e_{12}s_{23}d_1c_{134}$	aguacate joven (a)
	VI $e_{12}s_{23}c_{134}$	aguacate maduro (a)
	VI $e_{12}s_3c_{134}$	pasto de corta (a)
	VI $e_{12}s_{123}d_1c_{134}$	potrero degradado (i)
	VI $e_{12}s_2d_1c_{134}$	potrero muy degradado (i)
	VI $e_{12}s_{23}d_1c_{134}$	papa 2 (i)
	VI $e_{12}s_3c_{134}$	papa 3 (i)
	VI $e_{12}s_{23}d_1c_{134}$	papa 4 (i)
	VI $e_{12}s_{23}d_1c_{134}$	zanahoria 1 (i)
	VI $e_{12}s_3c_{134}$	zanahoria 3 (i)
	VI $e_{12}c_{134}$	zanahoria 4 (i)
	VI $e_{12}s_2d_1c_{134}$	brócoli 1 (i)
	VI $e_{12}s_{23}d_1c_{134}$	brócoli 2 (i)
	VI $e_{12}s_2c_{134}$	brócoli 3 (i)



Fig. 2. Cultivos en pendientes elevadas en la cuenca del río Birrís.

Otros factores limitantes son la pedregosidad (s_3) y la erosión (e_2) (Cuadro 3). La pedregosidad de algunas parcelas indica que hay un alto contenido de rocas que influyen en las labores de cultivo, en el crecimiento de raíces y en el movimiento del agua. La limitación por erosión se manifiesta en las marcas de erosión acelerada o inducida, observables en campo: pedestales (Figura 3a), raíces desnudas (Figura 3b), existencia de canales, terrazas, surcos, cárcavas (Figura

3c), movimientos en masa (Figura 3d) y la acumulación de sedimentos en el piedemonte y los drenajes (MAG y MIRENEM 1995).

Los factores limitantes determinan que la capacidad de uso de la tierra de las parcelas estudiadas, sea de categorías V y VI, en un 21% y 79%, respectivamente (Cuadro 3). Del total de las parcelas muestreadas, el uso actual más abundante es el de cultivo anual, 63%, aunque, según su capacidad, el 79% del total de las parcelas



Fig. 3. Indicadores visuales de erosión en la cuenca del río Birris. A. Pedestales. B. Raíces desnudas. C. Cárcavas. D. Movimientos en masa.

debería presentar cultivos permanentes. Según la metodología usada, el 79% de las parcelas se encuentran en sobreuso (Cuadro 3). Las parcelas tienen problemas de sobreexplotación por las siguientes razones: la existencia de cultivos anuales en terrenos cuyo uso potencial son pastos o cultivos permanentes; y la presencia de pasto en tierras donde debería haber cultivos permanentes (Cuadro 3). El sobreuso de las tierras genera importantes problemas ambientales, sociales y económicos, al implicar en muchas ocasiones procesos degradativos irreversibles (Maldonado y Rodríguez 1997). La sobreexplotación de las tierras se debe a que el uso de la tierra no se ha fundamentado con base a las limitaciones físicas y climáticas del terreno, o sea, basado en la capacidad de uso para producir en forma sostenida cultivos, pastos y bosque, sin deterioro del suelo y por periodos prolongados (Cubero 1996). No obstante, la capacidad de uso no debe ser el único criterio de ordenamiento territorial (Maldonado y Rodríguez 1997); así, debe tenderse a sistemas agrarios ambientalmente aceptables, económicamente viables y socialmente compatibles con la población local y la política nacional (Marchamalo 2004).

En el presente estudio el cálculo del factor C se realiza con la aplicación de los métodos y fórmulas originales de la RUSLE (Renard et al. 1996). Esto permite el análisis de cada subfactor previo al análisis del factor C. Si se empleara la aplicación informática del modelo RUSLE (Antezana 2001, Roldán y Gómez 2006, Chicharro 2007) para la estimación de las pérdidas de suelo, se podrían consultar en pantalla los factores C obtenidos del programa, pero no el desglose de las expresiones de cálculo de los subfactores.

Los resultados del subfactor cubierta aérea CC (Cuadro 4), muestran la influencia de la altura de caída de la gota de lluvia respecto a una misma fracción de caída cubierta. Según Morgan (1997), la altura de la vegetación es importante porque las gotas de agua que caen desde aproximadamente 7 m pueden alcanzar más del 90% de su velocidad terminal, pudiendo aumentar su capacidad erosiva si aumentan de tamaño por coalescencia.

Observando los resultados para coberturas completas, con F_c entre el 85-100%, cuando la altura de caída es baja (potreros: 0,2 m) el valor del subfactor CC es de 0,05, mientras que para alturas mayores (bosque natural o frutales: aproximadamente 3 m) el subfactor CC toma valores de 0,6 (Cuadro 4). Esto indica que la cobertura más próxima al suelo es más efectiva para reducir la energía de la lluvia que golpea la superficie de este. Como se analiza más adelante, esta es la razón de los bajos valores finales del factor C en las coberturas de pasto.

Los valores del subfactor cubierta del suelo, SC, muestran que la cubierta vegetal en contacto con el suelo en las parcelas arbóreas o pascícolas es más eficiente en la protección del suelo que la de las parcelas agrícolas (Cuadro 4), disipando la energía del impacto de las gotas y del agua en movimiento y, en consecuencia, reduciendo su efecto disgregador y de transporte (Morgan 1997). Además, dichos valores (Cuadro 4) pueden relacionarse con el hecho de que una cubierta de arbustos y árboles, una capa de hojas muertas o en descomposición, o una alfombra de pasto, son elementos protectores del suelo, reduciendo la energía del impacto de las gotas o del viento (Keller 1983 citado en Gómez 2002).

No obstante, los residuos de los cultivos que se dejan en el suelo tras la cosecha (Cuadro 4) tienen más influencia en la reducción relativa del valor del subfactor SC que los restos orgánicos en las coberturas arbóreas o pascícolas (Cuadro 4). Esto se debe, principalmente, a que la efectividad de la cubierta del suelo para reducir la erosión, que está caracterizada por el coeficiente b, es mayor en los cultivos que en el resto de las coberturas. Si se tienen 2 laderas, una forestal y otra agrícola, de iguales características, en las que se promueve una cierta cubierta en contacto con el suelo, en la primera, al existir previamente una cubierta vegetal en contacto con el suelo, el efecto de la cobertura adicional del suelo en la reducción del valor de SC es menor comparativamente que en parcelas agrícolas. En la parcela agrícola, al no existir una cubierta previa, los restos de la cosecha

Cuadro 4. Variables, subfactores del factor C y ratas de pérdida de suelo la cuenca del río Birris, Costa Rica, 2007.

SUBFACTORES		CC: cubierta aérea				SC: cubierta en contacto con el suelo				SR: rugosidad superficie	SLR: ratios pérdida suelo
Cobertura	PLU: uso previo tierra	F _c :	H	CC	b:	S _p (%):	R _t	SC			
		cubierta aérea	(pies): altura caída		coeficiente efectividad	cubierta suelo	(pulgadas): rugosidad				
Arbolado											
bosque natural	0,05	0,95	8,86	0,61	0,025	100	0,30	0,09	0,96	0,003	
bosque degradado	0,50	0,33	12,93	0,91	0,025	100	0,25	0,08	0,99	0,037	
aguacate joven	0,50	0,11	1,84	0,91	0,025	86	0,45	0,13	0,87	0,051	
aguacate maduro	0,05	0,85	9,62	0,68	0,025	100	0,25	0,08	0,99	0,003	
Pasto											
pasto de corta	0,50	0,81	1,39	0,30	0,025	100	0,25	0,08	0,99	0,012	
potrero carga normal	0,50	1,00	0,56	0,05	0,025	100	0,36	0,09	0,92	0,002	
potrero degradado	0,50	1,00	0,52	0,05	0,025	100	0,55	0,10	0,82	0,002	
potrero muy degradado	0,50	0,80	0,62	0,25	0,025	80	0,50	0,15	0,84	0,016	
Cultivo ^{(1) (2)}											
papa 1	0,99	0,00	0,00	1,00	0,05	0	0,70	1,00	0,74	0,731	
papa 2	0,99	0,71	0,79	0,35	0,05	0	0,60	1,00	0,79	0,270	
papa 3	0,99	1,00	1,96	0,18	0,05	0	0,80	1,00	0,69	0,122	
papa 4	0,99	0,00	0,00	1,00	0,05	12	0,35	0,57	0,93	0,522	
zanahoria 1	0,99	0,00	0,00	1,00	0,05	0	0,25	1,00	0,99	0,990	
zanahoria 2	0,99	0,73	0,68	0,32	0,05	0	0,25	1,00	0,99	0,316	
zanahoria 3	0,99	0,98	1,75	0,18	0,05	25	0,25	0,29	0,99	0,051	
zanahoria 4	0,99	0,00	0,00	1,00	0,05	50	0,25	0,08	0,99	0,081	
brócoli 1	0,99	0,00	0,00	1,00	0,05	4	0,40	0,83	0,90	0,735	
brócoli 2	0,99	0,82	1,17	0,27	0,05	0	0,90	1,00	0,65	0,171	
brócoli 3	0,99	1,00	1,92	0,18	0,05	25	1,00	0,33	0,61	0,034	
brócoli 4	0,99	0,02	1,15	0,98	0,05	84	0,75	0,02	0,71	0,015	

Nota:

Estados del cultivo: 1. Recién sembrado; 2. después de la aporca; 3. cobertura plena; 4. después de la cosecha.

Las ratas de pérdida de suelo, SLR, en una fase de un cultivo son valores instantáneos de ese estado del cultivo. Su cálculo es posible ya que en la cuenca de estudio se presentan simultáneamente a lo largo del año en distintas fincas; pero no representan que ese estado del cultivo permanezca invariable a lo largo del tiempo.

Fórmulas originales de los subfactores del factor C del modelo RUSLE (Renard et al. 1996):

$$CC = 1 - F_c \cdot \exp(-0,1 \cdot H); \quad SC = \exp(-b \cdot S_p \cdot \left(\frac{0,24}{Ru}\right)^{0,08}); \quad SR = \exp[0,66(R_u - 0,24)]$$

influirán proporcionalmente en la reducción de SC. Los restos que se dejan tras la cosecha tienen un efecto protector neto momentáneo, pero no tienen anclaje de raíz al suelo por lo que son fácilmente movilizables por lluvias fuertes.

Las parcelas medidas presentaron valores de rugosidad variables (Cuadro 4) aunque el factor de rugosidad, SR, mostró poca variabilidad y valores altos en todos los casos (Cuadro 4). Los cultivos de zanahoria (Cuadro 4), muestran una rugosidad homogénea en toda la duración de la rotación; sin embargo, esta presenta un mínimo en plena cobertura para los cultivos de papa y brócoli. Observando los datos de campo, de rugosidad en todas las parcelas (Cuadro 4) no se puede deducir para este estudio, que el nivel de rugosidad de las diferentes formaciones vegetales dependa de la morfología y densidad de las plantas, así como de su altura en relación con el calado del flujo (Morgan 1997).

Los resultados obtenidos de rata de pérdida de suelos (SLR) mensuales, de los diferentes estados de cultivo (Cuadro 4), muestran que la pérdida potencial de suelo en los cultivos agrícolas varía según su estado de desarrollo y el porcentaje de suelo desnudo expuesto a la acción erosiva (Morgan 1997). Cabe destacar la utilidad de las ratas de pérdida de suelo de cultivos, ya que pueden utilizarse en otras zonas donde las prácticas agrícolas para un tipo determinado de cultivo sean las mismas que las de la cuenca de estudio, como en gran parte de las laderas de la región centroamericana. Para la obtención del valor final del factor C hay que ponderar los SLR por la distribución del factor R de la zona concreta de estudio.

En el desarrollo del cultivo, desde el estado de la siembra o la plantación hasta llegar al crecimiento máximo, su cobertura aumenta disminuyendo la rata de pérdida de suelo (Cuadro 4). Por ello, los cultivos tienen una función protectora estacional, ya que en otros periodos presentan alta vulnerabilidad, lo que justifica la utilidad de una ordenación temporal de los usos agrícolas, o calendarización de los cultivos, como se propone en las rotaciones alternativas (Cuadro 1).

Los resultados obtenidos de SLR, tras la cosecha, muestran la influencia del modo en que esta se realiza (Cuadro 4) y el porcentaje de cubierta de suelo restante (Cuadro 4). El cultivo de brócoli presenta el menor valor de SLR, seguido de la zanahoria y la papa. En los 2 primeros cultivos se deja un alto porcentaje de restos tras la cosecha, 84% y 50%, respectivamente.

En el caso de la papa, antes de la cosecha se aplica un herbicida que actúa sobre la cobertura aérea, dejando los tallos secos y con aspecto pajizo, por lo que tras la cosecha el porcentaje de restos en el suelo es mucho menor que en los otros cultivos (12%), lo que redundará en un valor más elevado de SLR. En consecuencia, se recomienda promover las medidas que sustituyan el uso de estos herbicidas en la fase de cosecha.

Por otro lado, la perturbación en el terreno es menor en brócoli, porque en la cosecha se cortan las plantas en vez de arrancarlas, como ocurre en zanahoria y papa. Esto debería considerarse en el subfactor de uso previo de la tierra, subfactor PLU, que además, está influenciado por la cantidad de restos superficiales y subsuperficiales y por la cantidad de raíces muertas y vivas (Renard et al. 1996).

Las fases de siembra y plantación, tras la preparación del suelo o labranza, son las más vulnerables en el ciclo de cultivo (Cuadro 4). En este sentido, el ICE (1999) afirma que la pérdida de suelo por erosión hídrica en cultivos radicales, principalmente, en el sistema de labranza. Este consiste, generalmente, en el uso del arado de discos seguido del rotavator lo que destruye la estructura del suelo, con la pulverización excesiva de la capa arable y la compactación de la capa subyacente. Con el fin de reemplazar el arado de discos y el rotavator en la zona, se recomienda el uso del arado de cincel o el palín mecánico, que son instrumentos de labranza vertical que alteran menos el suelo y favorecen la infiltración, disminuyendo la escorrentía.

Los factores C calculados en este estudio están basados en datos recogidos de campo, según los métodos y formulación original de la RUSLE. En estudios anteriores, desarrollados en

esta misma cuenca (FAO 1989, ICE 1999, Saborío 2002, Gómez 2002, CATIE 2003, Marchamalo 2004 y 2007), se utilizaron tablas adaptadas a partir de las de USLE (Wischmeier y Smith 1978). La estimación del factor C en USLE está restringida a las entradas de vegetación de las tablas disponibles, a diferencia del modelo RUSLE que se puede utilizar para cualquier cubierta cuyos parámetros se calculen en campo según la metodología original.

El modelo USLE está calibrado a partir de un gran número de datos recogidos en parcelas experimentales en diversas localidades de EE. UU., en condiciones climáticas, edafológicas y topográficas diferentes a las del trópico centroamericano. Por ello, Sotcking (1987), indica que la USLE no puede ser empleada para estimaciones precisas en el trópico. Las tasas de erosión estimadas en Costa Rica, empleando la USLE, están sobreestimadas en varios estudios como indican Vahrson y Cervantes (1991).

La aplicación de la metodología y formulación original de RUSLE en campo, ha permitido acotar los valores de los factores C agrícolas en la cuenca. Así, los resultados del factor C, para las rotaciones actuales de los cultivos anuales en la cuenca de estudio, presentan valores máximos de 0,4 (Cuadro 5), menores que los considerados en otros estudios anteriores (FAO 1989, Saborío 2002, Marchamalo 2004). En la rotación de papa-zanahoria el valor del factor C es menor que la mitad del valor usado en FAO (1989) (Cuadro 5). Por ello se puede concluir que los valores de factor C empleados en estudios anteriores, procedentes de tablas genéricas del modelo USLE, estaban sobrestimados, por lo que tradicionalmente se ha considerado que los usos agrícolas son responsables de gran parte de la erosión. Ramírez et al. (2008) concluyen que en la cuenca media del río Reventado, adyacente a la de estudio, la erosión proveniente de las actividades agrícolas es moderada; además, hay otros factores que influyen en los procesos de degradación del recurso suelo y agua, tales como: los deslizamientos, la extracción inadecuada de grava y arena, la erosión de taludes en los márgenes de los caminos, el

deficiente control de torrentes y erosión en las vías terrestres, también factores bióticos como las taltuzas que deben considerarse en un programa de manejo integral de la cuenca.

El factor C varía de forma importante entre los terrenos con cubierta agrícola y el resto de coberturas vegetales (Cuadro 5). Los cultivos presentan los valores más altos, y dentro de ellos destacan las rotaciones de papa-zanahoria-papa y papa-papa-brócoli con valores de 0,39. Para la vegetación forestal o con pastos, el valor más alto se obtiene en bosque degradado, donde el factor C alcanza un valor de 0,037, al combinar una baja cobertura con una elevada altura de caída de gotas desde los árboles aislados. Se deduce que las coberturas más efectivas en el control de la erosión y la sedimentación en la cuenca del río Birrís son las arbóreas y pascícolas con un adecuado aprovechamiento. Así, desde el punto de vista de la protección contra la erosión, se recomienda favorecer la sustitución de usos agrícolas por usos forestales y pascícolas en la medida de lo posible.

Los pastos o potreros proporcionan una protección eficiente del suelo cuando son utilizados con una carga adecuada de ganado (Cuadro 5). El factor C calculado para los potreros muy degradados (Cuadro 5), coincide con los valores de otros estudios basados en la USLE (FAO 1989, ICE 1999, Saborío 2002, Marchamalo 2004). Sin embargo, el factor C calculado para los potreros en carga normal y los degradados (Cuadro 5) está por debajo de los valores de los estudios mencionados y es del mismo orden de magnitud que el bosque natural. El factor C calculado para bosque natural es 0,003 y coincide con los estudios mencionados. Este resultado verifica que la cubierta forestal con sotobosque o con materia orgánica es la más efectiva en el control de la erosión; asimismo, una densa cubierta herbácea puede tener casi la misma eficiencia y se obtiene más rápidamente (Morgan 1997). No obstante, el uso forestal contribuye más que el pascícola a incrementar la infiltración en el suelo y disminuir la escorrentía superficial con la consecuente disminución del potencial de erosión hídrica (Ríos et al. 2007).

En las cubiertas forestales el incremento de la infiltración puede ayudar a mejorar la recarga de los acuíferos y al mantenimiento del caudal base de los ríos, sobre todo en la época de estiaje (Marchamalo 2004). Además, la cobertura arbórea provee distintos servicios ambientales, entre los cuales destacan la conservación de suelos, la biodiversidad y la regulación hidrológica (CATIE 2007). En conjunto se verifica la importancia del bosque tanto por la protección del suelo contra las pérdidas de suelo como por su respuesta hidrológica.

Al analizar los subfactores de C de la parcelas de bosque y de potrero, se observa que los valores del subfactor de cubierta en contacto con el suelo, SC, son muy bajos (Cuadro 4), siendo el subfactor que más contribuye a los bajos valores del factor C (Cuadro 5). Este hecho confirma que el subfactor de cubierta en contacto con el suelo, SC, es el más importante para la determinación de los valores SLR y, por consiguiente, del factor C (Renard et al. 1996).

La similitud de factor C en potrero en carga normal y potrero degradado (Cuadro 5) se debe a que ambos presentan una cobertura casi completa. Sin embargo, el potrero degradado tiene una carga ganadera mayor, con una mayor compactación del suelo, cuyo efecto en la erosión está compensado por la alta rugosidad del escalonamiento característico (Figura 4) y la baja densidad de los andisoles.



Fig. 4. Potrero con escalonamiento por sobrepastoreo.

Los factores C para el pasto de corta y el potrero, sin llegar al estado de muy degradado, toman valores aproximadamente iguales (Cuadro 5). No obstante el pasto de corta proporciona importantes servicios hidrológicos, como su efecto favorable global sobre las variables hidrológicas reduciendo la escorrentía en un 73% y la erosión en un 57%, respecto del potrero tradicional (Marchamalo 2004); y favoreciendo las condiciones hidrológicas de los suelos con mayor velocidad de infiltración (ICE 1999). Por ello, se recomienda la utilización de pastos de corta en lugar de los pastos de piso en zonas críticas.

Los árboles frutales, con cubierta en contacto con el suelo bajo el dosel, presentan un factor C bajo (Cuadro 5). Es un uso poco extendido en la cuenca de estudio, a pesar de su promoción por parte de las instituciones oficiales (B. Molina. Usos de la tierra en la cuenca del río Birrís. MAG. Comunicación personal 2007). Según Marchamalo (2004), los frutales permitieron la reducción de la erosión, respecto al cultivo hortícola, en un 97% y la escorrentía en un 21%, ya que cesan los impactos debidos a la mecanización agrícola y aumenta y mejora la estabilidad de la cobertura, pudiendo llegar a revertir el proceso de degradación. Por todo esto, se recomienda extender el uso de árboles frutales en la cuenca.

Las propuestas de nuevas rotaciones de cultivo (Figura 5) permiten reducir los factores C con respecto a las rotaciones actuales. Así, manteniendo el resto de factores de la RUSLE invariables, se disminuyen las pérdidas de suelo potenciales de 20-40%.

En las propuestas a futuro se intenta que la cubierta vegetal del cultivo sea la de mayor protección, correspondiente al menor SLR, en los meses de mayor erosión pluvial (Cuadro 2). Cabe destacar que estos meses de descanso son los que los productores estarían dispuestos a adoptar (B. Molina. Usos de la tierra en la cuenca del río Birrís. MAG. Comunicación personal 2007). Estas propuestas a futuro muestran la importancia de una ordenación temporal o calendarización adecuada de las prácticas agrícolas para la disminución del impacto erosivo en

Cuadro 5. Factor vegetación (factor C) de coberturas arbóreas, de matorral y pastos en la cuenca del río Bírriis.

Cobertura	FACTOR C Mora 1987	FAO 1989	ICE 1999	Saborío 2002 Gómez 2002 CATIE 2003	Marchamalo 2004, 2007	Lianes 2009
Bosque						
Bosque primario	0,0001					
Bosque natural		0,003	0,001-0,003			0,003
Selva virgen		0,001				
Bosque denso				0,003-0,010		
Bosque claro, subestrato herbáceo denso				0,003-0,010		
Bosque claro, subestrato herbáceo degradado				0,010-0,100		
Bosque					0,003	
Bosque secundario		0,007				
Charral, pasto	0,018					
Charral					0,012	
Bosque degradado						0,037
Matorral/Pastos						
Matorral denso				0,003-0,030		
Matorral claro, subestrato herbáceo denso				0,003-0,030		
Matorral claro, subestrato herbáceo degradado				0,030-0,100		
Páramo				0,003-0,040		
Pasto		0,009	0,01-0,015		0,013	
Pasto (natural o mejorado)		0,008				
Vegetación natural baja (altura:50cm)		0,012				
Pastizal natural completo				0,030-0,010		
Pastizal natural pastoreado				0,040-0,200		
Pastizal cultivado (manejado)				0,003-0,040		
Pasto de corta						0,012
Potrero						0,013
Potrero carga normal						0,002
Potrero degradado						0,002
Potrero muy degradado						0,016
Cultivos permanentes						
Café, café con macadamia o pejobaye	0,300					
Cultivos perennes		0,079	0,086			
Café		0,09			0,080	
Banano		0,062				
Cacao		0,05				
Cultivos permanentes asociados (densos)				0,010-0,300		
Cultivos permanentes no densos				0,100-0,450		
Huertos de subsistencia				0,300-0,900		
Árboles frutales						0,003
Cultivos anuales						
Caña, caña brava	0,050					
Cultivos anuales		0,495	0,340			
Papa-zanahoria o papa-cebolla		0,615				
Maíz		0,519				
Tomate/chile dulce		0,502				
Caña		0,263			0,050	
Cultivos anuales de ciclo corto (1-6 meses)				0,300-0,800		
Cultivos anuales de ciclo largo (6 meses)				0,400-0,900		
Cultivos (cobertura baja)					0,650	
Cultivos (cobertura media)					0,500	
Cultivos (cobertura alta)					0,400	
Papa- brócoli						0,260
Papa-zanahoria						0,300
Papa-zanahoria-papa						0,390
Papa-papa-brócoli						0,390
Papa-zanahoria-brócoli						0,360

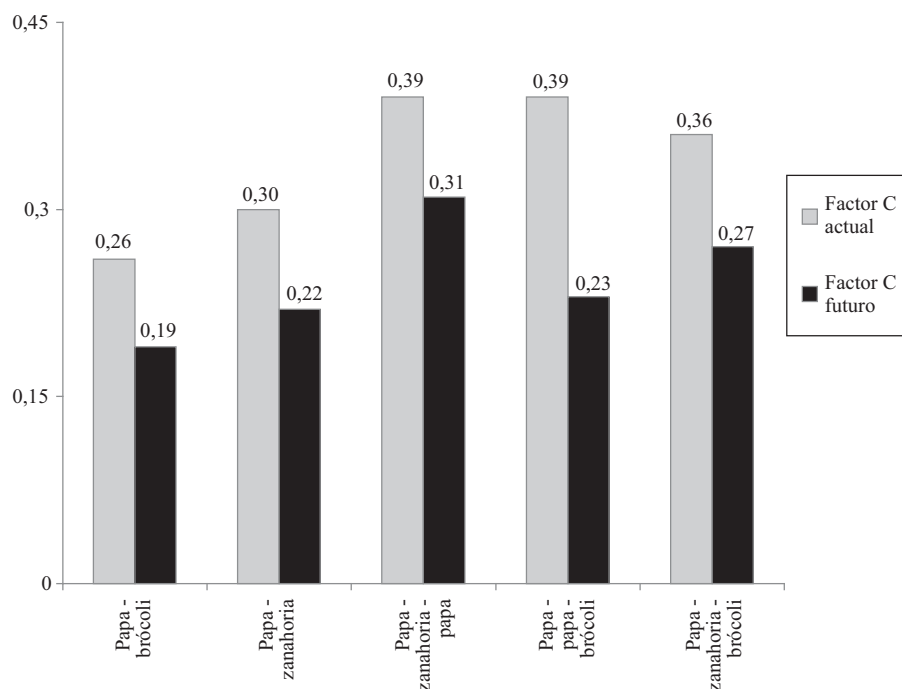


Fig. 5. Reducción potencial (%) de las pérdidas de suelo en la cuenca del río Birris (rotaciones actuales vs. propuestas a futuro).

los periodos críticos del año, coincidiendo con las recomendaciones de varios autores (Goujon et al. 1968).

Las rotaciones propuestas permiten realizar un ordenamiento del territorio sin cambios de uso, sino con ciertas limitaciones temporales y con la aplicación de nuevas tecnologías de cultivo conservacionistas. En la cuenca del río Birris se va a aplicar un esquema de Pagos por Servicios Ambientales (PSA), con el fin de compensar a los productores por las posibles disminuciones de productividad que se produzcan por la adopción de medidas conservacionistas de suelos y aguas. Estos fondos provendrán de una tarifa ambiental del agua y de la hidroelectricidad. Las alternativas tecnológicas para la reducción de la erosión ya están siendo aplicadas a nivel piloto en zonas

de la cuenca gracias al esfuerzo conjunto de la UMCRE-MAG-JASEC (Unidad de Manejo de la Cuenca del Río Reventazón - Ministerio de Agricultura y Ganadería - Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago).

CONCLUSIONES

La cuenca del río Birris se encuentra muy alterada por el desarrollo de actividades agropecuarias con gran relevancia socioeconómica, aunque este desarrollo carece de una planificación del uso de la tierra de acuerdo con su capacidad de uso.

El papel de los bosques existentes en la cuenca, a pesar de estar reducidos a los márgenes quebrados de los ríos y a las áreas protegidas, es

fundamental por su función en la estabilización, protección del terreno y regulación hidrológica. De ahí la importancia de su conservación y el fomento de la superficie forestal.

La metodología oficial de Costa Rica para la determinación de la capacidad de uso de la tierra sigue estando vigente, pero se recomienda su modificación para integrar aspectos ambientales y socioeconómicos sobre la conservación de suelos y aguas.

El cálculo de los subfactores y del factor C del modelo RUSLE, con la toma de datos en campo, según los métodos y formulaciones originales, supone una novedad para la modelización de la erosión en Costa Rica. Este estudio permite disponer de valores del factor C más precisos que los empleados en estudios anteriores para evaluar el papel de la cobertura vegetal en los procesos de erosión.

Las tasas de erosión elevadas en la cuenca de estudio se deben a varios factores, entre los cuales se encuentran las prácticas agrícolas inadecuadas. Para reducir la erosión de origen agrícola deben implementarse planes de manejo integrado que contribuyan a controlar este fenómeno mediante prácticas tecnológicas agrarias sostenibles.

Las ratas de pérdida de suelo, SLR, de los cultivos caracterizan la vulnerabilidad de las distintas fases en el ciclo de los cultivos, lo que hace posible identificar los momentos críticos para una ordenación temporal o calendarización de los usos agrarios de la cuenca. Esta información permitirá una asignación eficiente de fondos bajo un esquema de PSA. Así mismo, destacar la utilidad de estos coeficientes de SLR de cultivos ya que pueden utilizarse en otras zonas con prácticas agrícolas y culturales similares a las de la cuenca de estudio.

Los valores de factor C calculados permiten la simulación con mayor precisión del efecto de los escenarios de los usos del suelo futuros en los procesos de erosión y sedimentación, así como su uso en modelos de cambio climático para evaluar estrategias de adaptación.

Se recomienda que los planes de manejo que apliquen los fondos del PSA incluyan las siguientes propuestas respecto a las cubiertas vegetales, cuyos valores de C se han discutido anteriormente:

- Promover la sustitución de los cultivos anuales por usos forestales y pascícolas en aquellas zonas donde no sean compatibles con su capacidad de uso de la tierra.
- Potenciar los usos correspondientes a las capacidades de uso de la tierra V y VI que son respectivamente: pastos o bosque natural; y cultivos permanentes o plantaciones forestales.
- Promover los pastos de corta frente a los pastos de piso.
- En cultivos permanentes sin cobertura en contacto con el suelo, favorecer la instalación de especies vegetales de menor porte en contacto con el suelo.
- En cultivos agrícolas, aumentar la cubierta en contacto con el suelo en las etapas críticas del cultivo, procurando que la cobertura sea completa en la época de máxima erosividad de lluvia.
- En relación con lo anterior, evitar el uso de herbicidas que reduzcan la cubierta vegetal antes de la cosecha de la papa.
- Ordenar temporalmente los cultivos agrícolas, de manera que en los momentos de mayor erosividad pluvial la cubierta en contacto con el suelo sea máxima. La compensación económica a los agricultores para la ordenación temporal de los cultivos puede reducir notablemente los costos actuales de limpieza de embalses y reparación de infraestructuras hidroeléctricas.

Estas propuestas deberán ser acompañadas con un estudio socioeconómico y con una identificación de áreas prioritarias según su producción de sedimentos.

Para mejorar el cálculo de los valores del factor C sería de interés realizar investigaciones sobre la determinación del subfactor uso previo

de la tierra (PLU), la rugosidad de la superficie y el coeficiente de efectividad de la cubierta del suelo para reducir la erosión. Se recomienda, asimismo, realizar un seguimiento continuo de las precipitaciones y su intensidad para analizar la evolución de la erosividad de la lluvia.

AGRADECIMIENTOS

A los profesionales de CATIE, CIA-UCR, MAG, MINAE, ICE y UPM que han compartido su conocimiento y apoyado el desarrollo de esta investigación, en especial a la Ing. Beatriz Molina (MAG), al M.Sc. Raffaele Vignola (CATIE) y a los Dres. Alfredo Alvarado y Warren Forsythe (CIA/UCR). A los productores que han hecho posible esta investigación, en especial a la familia Montero y a la comunidad de Buenavista de Pacayas.

Elena Lianes contó con el financiamiento del programa de Proyectos de Fin de Carrera para el Desarrollo de la Universidad Politécnica de Madrid. Este estudio ha sido elaborado en el marco del Proyecto Bosques Tropicales y Adaptación al Cambio Climático –Trofcca–, ejecutado por CATIE en América Central, a través del convenio suscrito entre CATIE y CIFOR en setiembre del 2005. Trofcca recibe el apoyo financiero de la Comisión Europea mediante contrato No. EuropeAid/ENV/2004-81719. Las ideas y opiniones expresadas en este documento no reflejan la posición de la Unión Europea, estas son responsabilidad de los autores. Los autores contaron con el apoyo del proyecto PCI-AECID: “Mejora de la eficiencia de captación y recarga de los sistemas de abastecimiento de agua mediante ordenamiento de los usos de la tierra en Centroamérica”.

LITERATURA CITADA

ANTEZANA J. 2001. Calibración de los factores de erosión utilizando la ecuación universal de perfiles de suelo revisado RUSLE en sistemas de producción agrícola de la Cuenca Taquíña. Centro de Levantamientos

Aeroespaciales y aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales (CLAS), Cochabamba, Bolivia. 77 p.

ÁVALOS A. 2007. ICE suspende cortes de electricidad en todo el país. *La Nación*, 5/5/2007. La Nación. San José, Costa Rica. http://www.nacion.com/In_ee/2007/mayo/05/pais1085589.html (consulta 6/10/2008).

CATIE. 2003. Caracterización y diagnóstico de las subcuencas tributarias del sistema hidroeléctrico Birris. Informe de consultoría presentado a la Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago (JASEC). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 33 p.

CATIE. 2007. Propuesta presentada a UICN para el Fondo de Incidencia en Política Ambiental. Contribución a la política de pago por servicios hidrológicos para el sector hidroeléctrico de Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 19 p.

CHICHARRO V. 2007. Estudio de la evolución de las pérdidas de suelo en el incendio de Riba de Saclies (Guadalajara). Aplicación y análisis comparativo de los modelos USLE y RUSLE. Trabajo fin de carrera en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 146 p.

CUBERO D. 1996. Manual de manejo y conservación de suelos y aguas. Editorial de la Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica, 278 p.

FAO. 1989. Evaluación de los estados de erosión hídrica de los suelos y delimitación de áreas críticas por pérdida del horizonte A en la cuenca del Río Reventazón. Gobierno de Costa Rica. Informe Técnico No. 1-E. Roma: FAO. 133 p.

GÓMEZ F. 2002. Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica. Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. UCR. San José, Costa Rica. 191 p.

GÓMEZ F. 2007. Erosividades de lluvia para las estaciones meteorológicas de Cachí y Sanatorio Durán en el periodo 1999-2006. Instituto Costarricense de Electricidad, ICE. San José, Costa Rica. Sin publicar.

- GOUJON B., DE VERGENETTE B., DE COIGNAC R., VELLY C. 1968. Conservation des sols en Afrique et al Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques N.º 118-119-130-121. Francia.
- GUTIÉRREZ O. 2001. Estimación de costos de restauración de bosques y ajuste ambiental de tarifa eléctrica: Estudio de caso de la empresa hidroeléctrica JASEC en Costa Rica. Tesis de maestría, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 75 p.
- ICE. 1999. Plan Integral de Manejo de la Cuenca del Río Reventazón. Instituto Costarricense de Electricidad. San Jose, Costa Rica. 550 p.
- KUENSTLER W. 1998. Guidelines for use of the Revised Universal Soil Loss Equation (Rusle) versión 1.06. on mined lands, construction sites and reclaimed lands. Chapter five: C factor: Cover-management. Office of Technology Transfer. Denver, CO, USA. 20 p.
- LOVÓN H. 2003. Contribución al estudio y manejo de la cuenca alta del Río Turrialba, Costa Rica. Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 122 p.
- MAG, MIRENEM. 1995. Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras en Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería y Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas. San José, Costa Rica, 63 p.
- MALDONADO T., RODRÍGUEZ C. 1997. Estudio, análisis y cartografía de la capacidad de uso de la tierra en las clases forestales. Costa Rica. Fundación Geotrópica, San José, Costa Rica. 34 p.
- MARCHAMALO M. 2004. Ordenación del territorio para la producción de servicios ambientales hídricos. Aplicación a la cuenca del Río Birris (Costa Rica). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 409 p.
- MARCHAMALO M. 2007. Cuantificar el potencial de conservación de suelo y agua basado en un análisis territorial de la cuenca. Estudio de caso de la cuenca del río Birris. Proyecto: Contribución a la política de pago por servicios hidrológicos para el sector hidroeléctrico de Costa Rica. Primer Informe. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 174 p.
- MORA I. 1987. Evaluación de la pérdida de suelo mediante la ecuación universal (EUPS); aplicación para definir acciones de manejo en la cuenca del río Pejiballe, vertiente Atlántica, Costa Rica. Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 174 p.
- MORGAN R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Mundi-Prensa, Madrid, España. 343 p.
- RAMÍREZ L., ALVARADO A., PUJOL R., BRENES L.G. 2008. Caracterización física de la cuenca media del Río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 32(2):73-92.
- RENARD K.G., FOSTER G.R., WEESIES G.A., MCCOOL D.K., YODER D.C. 1996. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook* 703. US Government Printing Office. Washington DC. 384 p.
- RÍOS N., CÁRDENAS A.Y., ANDRADE H.J., IBRAHIM M., JIMÉNEZ F., SANCHO F., RAMÍREZ E., REYES B., WOO A. 2007. Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 45:66-71.
- ROBLEDO W.I. 2003. Pago por servicios ambientales para la implementación de sistemas agroforestales en áreas críticas de las cuencas generadoras de energía eléctrica María Lina y Los Esclavos, Guatemala. Tesis de maestría Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 174 p.
- ROLDÁN M., GÓMEZ V. 2006. Aplicación de la RUSLE v.1.06 en la evaluación de la pérdida de suelo en la cuenca alta del río Cega. Comparación de factores RUSLE-USLE. *Revista de Edafología (SECS)*, 10 (3):11-19.
- SABORÍO J. 2002. Informe final: Estudio erosión potencial, cuenca del río Savegre, Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad, Costa Rica. 41 p.

- STOCKING M. 1987. Measuring land degradation. In: P. Blaikie y H. Brookfield (eds). Land degradation and society. Londres, Nueva York. Methuen. 296 p.
- SWISHER M. 1999. Manual para los estudios de campo, Módulo 1. La Ecología de la parcela. Universidad de la Florida- Universidad de Costa Rica. Determinación de la textura del suelo en el campo. 6 p.
- USDA. 2003. Keys to soil taxonomy. Soil survey staff. USDA. 9th ed. USA 332 p.
- VAHRSON W.G., CERVANTES C. 1991. Escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal, Costa Rica. In: W.G. Vahrson, M. Alfaro y G. Palacios (eds). Memoria del Taller de Erosión de Suelos. Universidad Nacional., Heredia, Costa Rica. 236 p.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. USDA, Agriculture Handbook 537. Washington, USA 69 p.