

Capacidad potencial de las franjas ribereñas del río Bermúdez para reducir la erosión

Gaetan Buzolich¹; Marine Donal²;
Jenny Reynolds Vargas³;
Laura Torres Corral⁴

La capacidad de las franjas ribereñas para impedir la erosión es relativamente baja a todo lo largo del río Bermúdez.

El uso del suelo en las franjas cercanas al río varía mucho sobre distancias a menudo muy cortas. Los valores de la capacidad de las franjas ribereñas para reducir la erosión obtenidos fueron muy diferentes según los lugares. Esto puede explicarse en función de tres factores: a) la fuerte pendiente, b) la poca presencia de bosques protectores o pastos en las márgenes del río y c) la urbanización continua cerca a todo el lecho del río.

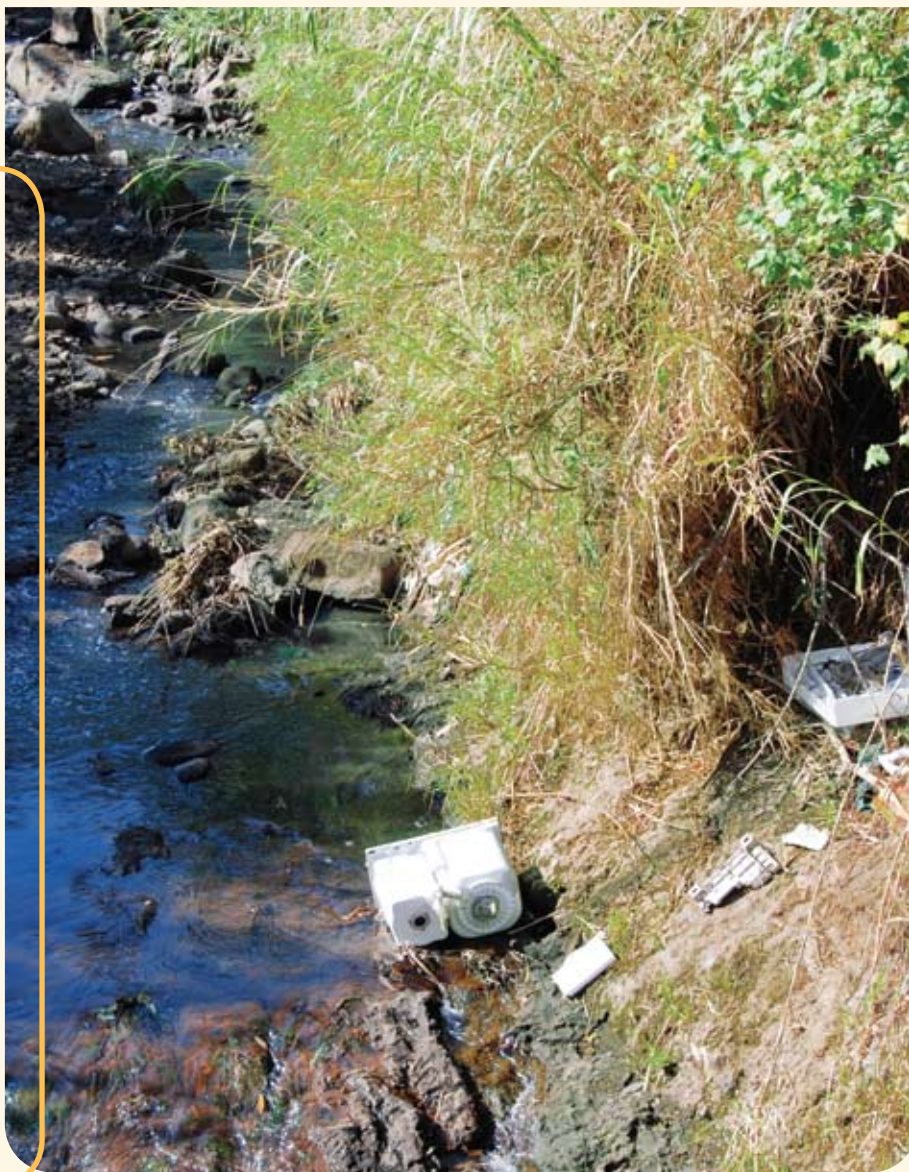


Foto: Jenny Reynolds.

¹ 214 Le Grand Chemin, 69210 Lentilly, Francia. gaetan.buzolic@libertysurf.fr

² 214 Le Grand Chemin, 69210 Lentilly, Francia. mdonal@caramail.com

³ Centro de Hidrología Ambiental, Universidad Nacional. Apartado 86-3000, Heredia, Costa Rica. jreynold@una.ac.cr

⁴ Centro de Hidrología Ambiental, Universidad Nacional. Apartado 86-3000, Heredia, Costa Rica. ltorral@eic.ucr.ac.cr

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar, de manera semi-cuantitativa, la capacidad de las márgenes del río Bermúdez, en el Valle Central de Costa Rica, para reducir la erosión y la contaminación originadas en áreas adyacentes. Para ello se propone una fórmula que toma en cuenta el uso del suelo y la topografía, considerados los factores más importantes que determinan los procesos erosivos.

El trabajo se llevó a cabo entre marzo y mayo del 2000 a partir del inventario visual directo de los usos del suelo en una franja de 50 metros de ancho a ambos lados del cauce del río. Los resultados obtenidos indican que la capacidad de las áreas ribereñas para impedir la erosión es relativamente baja. Las zonas más críticas corresponden a cafetales sobre pendientes fuertes, sin cobertura herbácea, y a los charrales quemados. El estudio reveló además que existe un número alto de puntos de descarga de desechos líquidos y sólidos, lo cual es evidencia de que las zonas urbanas cercanas son una fuente de contaminación importante que contribuye a aumentar el deterioro del agua del río. Se concluye que las prácticas actuales de uso del suelo sobre las márgenes del río Bermúdez y el manejo de los desechos no sólo no impiden, sino que favorecen los procesos erosivos y la contaminación del río.

Palabras claves: Cuencas hidrográficas; erosión; erosión por el agua; uso del suelo; utilización de la tierra; polución del agua; riberas; río Bermúdez; Costa Rica.

Summary

Potential capacity of the Bermudez river borders to reduce erosion. This study was aimed at determining the capacity of the Bermudez river borders to reduce erosion and pollution originated in surrounding areas. A formula that takes into account land cover and slope is proposed, as these are the most important factors that determine erosive processes.

The study was conducted between March and May 2000, and was based on a visual inventory of land uses on a 50-meter strip along each side of the river. Results indicate that the capacity of the borders to reduce erosion is relatively low on both sides of the river.

The most critical areas are coffee plantations on steep slopes with no herbaceous cover, and burned regeneration ('charrales'). Several dumpings of liquid and solid wastes were observed. This indicates that nearby urban areas are sources of contamination that contribute to increase deterioration of water quality. Current land-use and waste-management practices along the Bermudez river contribute to increase erosive processes and pollution of water.

Keywords: Watershed; erosion; water erosion; land use; water pollution; margins; Bermúdez river; Costa Rica.

Introducción

El incremento de las actividades económicas y sociales en todo el mundo ha estado acompañado por una presión cada vez mayor sobre los ecosistemas acuáticos (UNEP 1994). En Centroamérica en general, y en Costa Rica en particular, el aumento de la población y las deficientes regulaciones y controles sobre las actividades humanas han causado

un deterioro, a veces muy difícil de revertir, en los cuerpos de agua (Reynolds-Vargas 1996).

El Valle Central de Costa Rica es una región rodeada por sistemas montañosos de fuertes pendientes y con una precipitación intensa (2500 mm anuales en promedio) durante al menos siete meses del año (IMN, Archivos 2005). Estos factores sugieren que la erosión puede ser una fuente importante de degradación

de las aguas de los ríos debido al arrastre de sedimentos, de residuos de agroquímicos y de otras sustancias químicas de diversos orígenes. Además de esto, una vez iniciado el proceso erosivo, el lavado de la superficie del suelo en los terrenos adyacentes hace que el problema se agrave de manera irreversible conforme pasa el tiempo.

Es conocido el hecho de que el manejo adecuado de las áreas ribe-

reñas de los ríos, y en particular la preservación de la cobertura vegetal en estas áreas, permite limitar la erosión y la contaminación difusa en las aguas (Winter et al. 1998). La legislación de Costa Rica reconoce la importancia de las márgenes como últimas barreras posibles para evitar la degradación de los cuerpos de agua y desde hace muchos años se ha intentado limitar el efecto negativo de los usos del suelo sobre los cauces. Entre estas leyes se incluyen: la Ley General de Aguas (La Gaceta, 1942, artículos 1-9), que establece un área de protección de 5 metros de ancho a ambos lados del río; la Ley de Tierras y Colonización (La Gaceta, 1961), que establece en su artículo 7 la obligación de preservar un área de 200 metros en ambos lados de un río no navegable en un terreno plano y de 300 metros en terreno quebrado; y la Ley Forestal (La Gaceta, 1996,) que prohíbe en sus artículos 33 y 34 la corta de árboles en una franja a ambos lados del río de 10 metros en terreno plano y de 50 metros en terreno quebrado.

El río Bermúdez se sitúa en la cuenca del río Virilla, región de gran importancia desde el punto de vista socioeconómico ya que en ella se concentra más de la mitad de la población del país. Sus aguas son de buena calidad en la parte superior, pero sufren un deterioro gradual aguas abajo, conforme cruzan áreas cultivadas de café y zonas urbanas. El manejo inadecuado de las aguas negras y la contaminación con residuos de origen agrícola e industrial han sido señalados como los principales factores causantes de degradación de las aguas de este río (Castro et ál. 1996). Este deterioro representa un riesgo para la salud pública, ya que las aguas contaminadas no deberían ser empleadas en actividades agrícolas y menos aun como fuente de agua potable. A pesar de esto, se ha observado que durante la época seca algunos agricultores utilizan las aguas del río para irrigar cultivos de hortalizas.

Por otra parte, se ha comprobado que existe una relación estrecha entre el río Bermúdez y el acuífero Barba (Reynolds Vargas, datos no publicados), lo que abre la posibilidad de que ocurra un ingreso directo de contaminantes hacia las aguas subterráneas que abastecen a las poblaciones de la zona. El río ha perdido mucho de su calidad escénica, por lo que también se excluye la posibilidad de utilizarlo para actividades recreativas.

El objetivo de este estudio fue realizar un análisis de la capacidad de las márgenes del río Bermúdez para reducir la contaminación difusa de las aguas y la erosión. Se espera que la metodología propuesta constituya una herramienta que pueda ser utilizada por los actores locales y los científicos para planear acciones, tanto en la cuenca del Bermúdez como en otras cuencas.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

El río Bermúdez mide unos 26 kilómetros desde su nacimiento en el Monte de la Cruz, al norte de la ciudad de Heredia, hasta su desembocadura en el río Virilla, en San Rafael de Alajuela (Fig. 1). Sirve de

drenaje a una subcuenca de 74 km², que tiene una topografía muy irregular, especialmente en su parte media y superior (Castro et ál. 1996). Los ecosistemas originales, de los cuales quedan solamente remanentes, corresponden a las zonas de vida denominadas Bosque Premontano Húmedo y Bosque Premontano Muy Húmedo, de acuerdo con la clasificación de Holdrige (1982).

Definición de los parámetros estudiados

Cobertura de las márgenes del río o franjas ribereñas. Está constituida por los elementos que cubren la superficie de una zona. Estos elementos o categorías fueron definidas por los autores de la siguiente manera: formaciones arbóreas, charrales, pastos, cultivos y urbanización. Se incluye además como categoría el “suelo desnudo”, que identifica las áreas sin cobertura de ningún tipo. De ser necesario, cada categoría se subdividió y posteriormente se estimaron visualmente los porcentajes relativos de cobertura por cada elemento:

Formaciones arbóreas: Se distinguieron cuatro tipos de formaciones arbóreas: los bosques en crecimiento

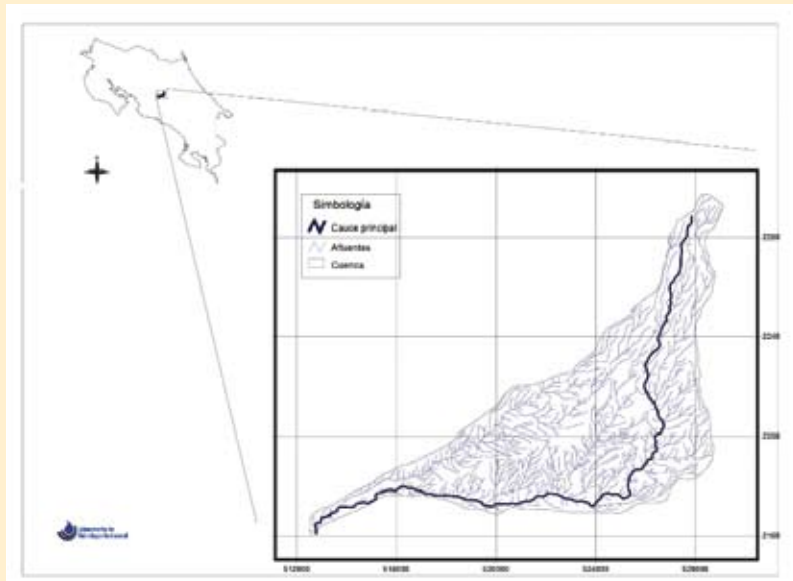


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Bermúdez

natural o semi-natural, las plantaciones de árboles, los árboles aislados y las cercas vivas. Un **bosque** es una formación vegetal natural o semi-natural compuesta por un estrato arborescente denso e irregular con varias especies. Una **plantación de árboles** es una formación vegetal plantada a propósito compuesta por un estrato arborescente regular con 1 ó 2 especies. Los **árboles aislados** son todos aquellos que han crecido en forma natural o han sido sembrados, que no forman conjuntos y que no están incluidos en las otras categorías. Una **cerca viva** es una alineación de árboles formando una barrera vegetal. Se observaron tres posiciones de cercas vivas con relación al río: perpendicular al río, paralela al río y la combinación de los dos anteriores.

Charrales: El charral es una formación vegetal compuesta principalmente de herbáceas y arbustos. Puede ser temporal en el caso de una regeneración después del abandono de un cultivo o una perturbación (fuego, corte) o permanente en lugares que no permiten el crecimiento de árboles (por ejemplo, en zonas muy rocosas o debido a la existencia de una capa de suelo muy delgada).

Pastos: Esta categoría incluye las áreas cubiertas por diferentes especies de gramíneas utilizadas como cobertura ornamental (césped en jardines y centros recreativos) y para alimentación de ganado.

Cultivos: Un cultivo es cualquier plantación artificial (excepto de árboles) cultivada de manera uniforme y sistemática. En esta zona del Valle Central, el café es el cultivo predominante. En menor proporción se encuentran los cultivos de cereales, hortalizas y flores.

Suelo desnudo: Son todas las terrenos sin vegetación, con suelo sin cobertura de ningún tipo.

Urbanización: Se distinguen cuatro tipos de construcción: las casas de habitación, los edificios de empresas, las construcciones dentro de fincas y las carreteras.

Puntos de descarga. Son las fuentes de contaminación directa, química u orgánica, en forma de descarga de efluentes industriales y domésticos, así como también acumulaciones o depósitos de basura sólida. Fueron determinados por conteo directo en el campo.

Marcas de erosión. Se incluyen en este grupo los surcos, cárcavas, depósitos aluviales y afloramientos localizados del substrato rocoso. La intensidad de la erosión fue evaluada de manera cualitativa y a cada marca de erosión se le asignó un valor de acuerdo con la siguiente escala: 0 = ausencia de marca; 1 = presencia de marcas, 2 = presencia de marcas muy extendidas, 3 = presencia de marcas muy extendidas y de profundidad considerable.

Pendiente de las franjas ribereñas. La pendiente fue estimada visualmente en grados.

Modo operativo

El trabajo se llevó a cabo entre marzo y mayo del 2000, al final de la estación seca en el Valle Central, por medio de la observación directa de los usos del suelo en una franja de 50 metros de ancho a ambos lados del río Bermúdez, a lo largo del cual se identificaron los segmentos descritos en la sección anterior. La evaluación se realizó a lo largo de un trayecto que se inició en un puente situado dos kilómetros aguas arriba del pueblo de Los Ángeles, cerca del nacimiento del río, hasta su desembocadura. Para efectos de este estudio, se denomina Lado A a la margen izquierda del río, y Lado B a la margen derecha del río, en ambos casos mirando aguas abajo.

Análisis de datos

La relación entre los diferentes parámetros de cobertura, pendiente y marcas de erosión fue calculada por kilómetro. Para determinar cuán significativas son las relaciones entre parámetros, se calcularon coeficientes de correlación.

Estimación de la capacidad de las áreas ribereñas del río para reducir la erosión

Se tomaron en cuenta tres factores: el tipo de cobertura, el área cubierta por la misma y la pendiente.

Tipo y función de la cobertura. Es conocido el hecho de que cada tipo de uso del suelo tiene un efecto diferente sobre la producción de sedimentos (Dunne y Dietrich 1982). Por esto, se asignó un coeficiente entre 0 y 10 a cada tipo de cobertura, que representa su capacidad relativa para resistir a la erosión (Cuadro 1).

Se asignó al bosque natural, en estado primario o en crecimiento secundario, el coeficiente más alto (10), tomando en cuenta que estas zonas son las que poseen mayor resistencia a la erosión (Derksen 1991). Las plantaciones de árboles, a causa de su uniformidad, son menos capaces de detener el arrastre de suelo que los bosques naturales, por lo que se les asignó un coeficiente de 8. Las áreas con árboles aislados tienen un coeficiente de 6 porque no forman conjuntos, es decir, estructuras vegetales eficientes para impedir la erosión, aunque tampoco la favorecen.

Las cercas vivas tienen efectos diferentes según su posición en relación con el río. Una cerca de posición A (paralelo al río) tiene un coeficiente relativamente alto (7) porque forma una barrera a la escorrentía. Al contrario, una cerca de posición B (perpendicular al río) tiene el coeficiente más bajo (3) porque más bien puede canalizar el escurrimiento superficial del agua y así favorecer la erosión. Las cercas de posición C tienen un coeficiente medio (5) porque son una mezcla de los dos anteriores.

Varios autores (FAO 1967; Derksen 1991; Forsythe 1991) coinciden en que los pastos constituyen el mejor tipo de cobertura posible, después de los bosques, para impedir la erosión. Se ha señalado que los pastos sufren a veces un dete-

Cuadro 1.

Capacidad de cada tipo de cobertura para reducir la erosión en las márgenes del río Bermúdez

Cobertura	Coefficiente asignado
Bosque natural	10
Plantación de árboles (monocultivo)	8
Arboles aislados	6
Cerca viva, posición A	7
Cerca viva, posición B	3
Cerca viva, posición C	5
Pasto	7
Charral	4
Café	5
Otro cultivo (no permanente)	4
Suelo desnudo	1
Casa de habitación	1
Edificio de empresa	1
Construcción en finca	1
Carretera	0

rioro importante debido al pisoteo por el ganado, proceso que destruye la cobertura vegetal y compacta el suelo (Cervantes y Vahrson 1991). Sin embargo, las áreas evaluadas en este estudio prácticamente no han estado sujetas a sobrepastoreo a causa de la cría de ganado. Fueron incluidas en la categoría de pastos las áreas con una amplia cobertura de gramíneas, con un coeficiente de 7. Las áreas con pastos dañados por cualquier motivo, generalmente incluyeron también un gran porcentaje de suelo desnudo, por lo que se les asignó un coeficiente más bajo.

Los charrales tienen una eficiencia media como reductores de la erosión. Generalmente son quemados generalmente cada año en la estación seca y no tienen tiempo para desarrollar un sistema de raíz importante para frenar el arrastre de partículas de suelo. Además, algunas especies presentes en los charrales, con un sistema radicular poco desarrollado, son arrastradas por el agua en la época de lluvias más intensas, quedando un suelo desnudo durante ciertos periodos del año. Por esta razón, se les asignó un coeficiente de 4.

El café es un cultivo permanente y tiene un sistema radicular con una profundidad máxima de 60 cm. Por tanto, se considera más eficiente que los charrales para impedir la erosión. Pero, a causa de la estructura

y distribución de las plantas y de las prácticas culturales (poda de ramas al final de la estación seca, distancia entre los arbustos), se considera que no puede alcanzar la eficiencia de un pasto. Se le asignó un coeficiente de 5. La eficiencia de los cultivos anuales para detener la erosión es, evidentemente, menor que la de los cultivos permanentes (Dercksen 1991), por lo que se le atribuye un coeficiente de 4.

El suelo desnudo es prácticamente incapaz de impedir la erosión (FAO 1967), por lo que se le asignó un coeficiente de 1.

Es sabido que las áreas urbanizadas, al impermeabilizar los suelos y disminuir la capacidad de infiltración de agua en los mismos, favorecen significativamente la escorrentía superficial (Marsh 1997) y concentran y desvían los caudales en determinadas direcciones. Por esta razón, las áreas cubiertas por construcciones favorecen, de manera indirecta, la erosión en las franjas ribereñas. Por otro lado, los edificios, paredes y tapias pueden funcionar como barreras para la entrada de agua y sustancias disueltas o en suspensión al río. Para tomar en cuenta ambos factores se asignó a las construcciones en general, incluyendo las casas de habitación y edificios, un coeficiente de 1, mientras que las calles, carreteras y otras superficies asfaltadas tienen un coeficiente de 0.

Tomando en cuenta lo anterior, se considera que la **capacidad de la cobertura** para reducir la erosión (CC) es el producto de la multiplicación del **coeficiente de cobertura** por el **área ocupada** (en porcentaje).

Así, la ecuación para calcular la capacidad para reducir la erosión (CC)

se expresa de la siguiente forma:

$$CC = \sum_{i=1}^n (\text{Coeficiente } C_{o_i} * A_i)$$

donde,

CC: capacidad de la cobertura para reducir la erosión.

Coeficiente C_{o_i} : coeficiente para cada tipo de cobertura, asignado según la escala de 1 a 10.

A_i : área ocupada por cada tipo determinado de cobertura, expresada en porcentaje de espacio ocupado por esta cobertura.

n: número de tipos de cobertura presentes.

Función de la pendiente. Para tomar en cuenta la influencia de la pendiente se creó el **coeficiente de pendiente (CP)**. Como la erosión aumenta de una manera exponencial en función de pendiente (Sánchez y Álvarez 1991), el coeficiente tiene que hacer bajar la capacidad de las márgenes para reducir la erosión en la misma proporción. El coeficiente varía entre 0 y 1 y es dado por la fórmula siguiente:

$$CP = -0.0003x^2 + 1$$

donde,

CP = coeficiente de pendiente

x = pendiente en grados

De esta manera, una pendiente de 10° tiene un coeficiente de 0,97 y una pendiente de 55° tiene un coeficiente de 0,093. Un CP de 0, resulta que se alcanza para ángulos de 58° y mayores, no tiene capacidad para reducir la erosión. Mientras tanto, un CP de 1, que se alcanza para terrenos planos donde la pendiente x es cero, tiene la máxima capacidad. Otros valores se pueden obtener usando la ecuación o directamente de la Fig. 2.

La **capacidad de las franjas ribereñas** para reducir la erosión (CM) está dada por:

$$CM = CC * CP$$

El valor mínimo que toma la CM es cero, que se alcanza cuando el CP es cero (pendiente $>58^\circ$) o si la CC es cero (por ejemplo, si toda el área está asfaltada). El máximo valor de CM es 10, por ejemplo, en el caso de que el área esté ocupada por bosque (coeficiente $C_o = 10$), sobre todo en terreno plano ($CP = 1$).

Resultados

Cambios en la topografía y en el uso del suelo

Las pendientes de las franjas ribereñas y el uso del suelo son semejantes a cada lado del río a lo largo de su extensión (Fig. 3). Desde el kilómetro 0 (cerca del nacimiento) al 2, las pendientes son bajas ($<5^\circ$). En el kilómetro 3, aumentan mucho hasta alcanzar un promedio de 30° . Se mantienen altas hasta el kilómetro 13. Después, disminuyen gradualmente hasta el kilómetro 18, para seguir con un promedio entre 5° y 10° hasta la desembocadura. En resumen, el río Bermúdez posee en sus márgenes una topografía muy quebrada entre los kilómetros 3 y 13.

El estudio de los cambios en las coberturas a lo largo del río ha revelado cinco segmentos diferentes (Fig. 4):

Segmento 1

Parte superior del río, kilómetros 0 a 3. Las dos márgenes del río tienen una cobertura del suelo semejante, con un predominio de árboles (35%) y de pastos (30%). La urbanización ocupa un 17% del área. Las otras coberturas son bajas. Así, estamos en una zona rural de pastos rodeados de cercas vivas y de bosques. La urbanización se encuentra en forma de carreteras y edificaciones aisladas alrededor del pueblo de Los Ángeles.

Segmento 2

Parte media del río, kilómetros 4 a 12. Las dos franjas ribereñas son todavía semejantes. Observamos un descenso en el área cubierta de árboles (hasta un 25%) y una baja significativa en el área de pastos (hasta $<5\%$). La urbanización se mantiene cerca de 10%. Hay un aumento significativo de los cultivos, charrales y suelo desnudo (20% cada uno).

Esta parte corresponde a una zona de cafetales en pendientes fuertes, asociadas a grandes zonas de suelo desnudo. Existen algunas zonas de urbanización, concentradas en las cercanías de los puentes y que pertenecen a los pueblos de San

Rafael, San Pablo y Santo Domingo. Los bordes del río están a menudo cubiertos de charrales, sobre tierras no utilizadas, en pendientes fuertes.

Segmento 3

Parte baja del río, kilómetros 13 al 18. Se detectó una diferencia en el uso de la tierra entre una margen del río y la opuesta. En el lado izquierdo, los pastos aumentan (20%), paralelamente a una ligera baja de la urbanización, árboles y cultivos. En cambio, en el lado derecho, aumenta la urbanización (20%) y un poco los charrales (27%) y los pastos (10%), mientras que bajan los cultivos, árboles y el suelo desnudo.

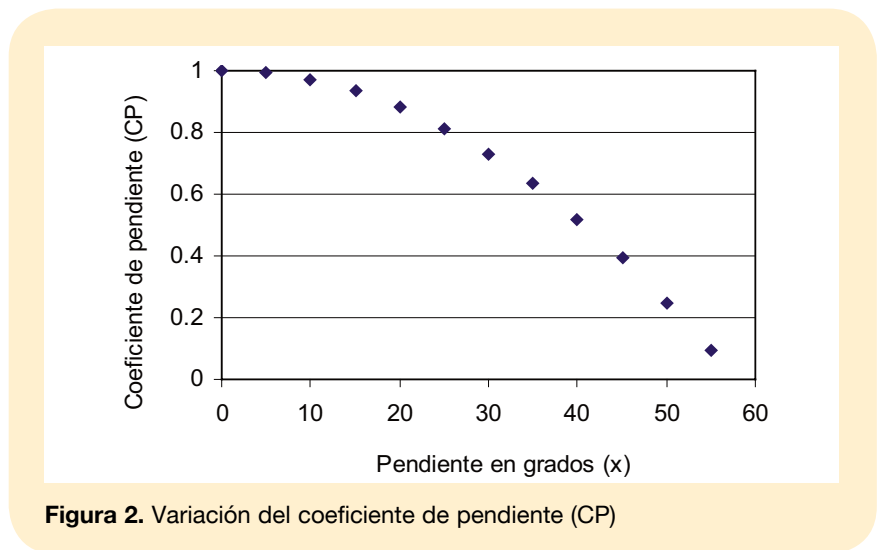


Figura 2. Variación del coeficiente de pendiente (CP)

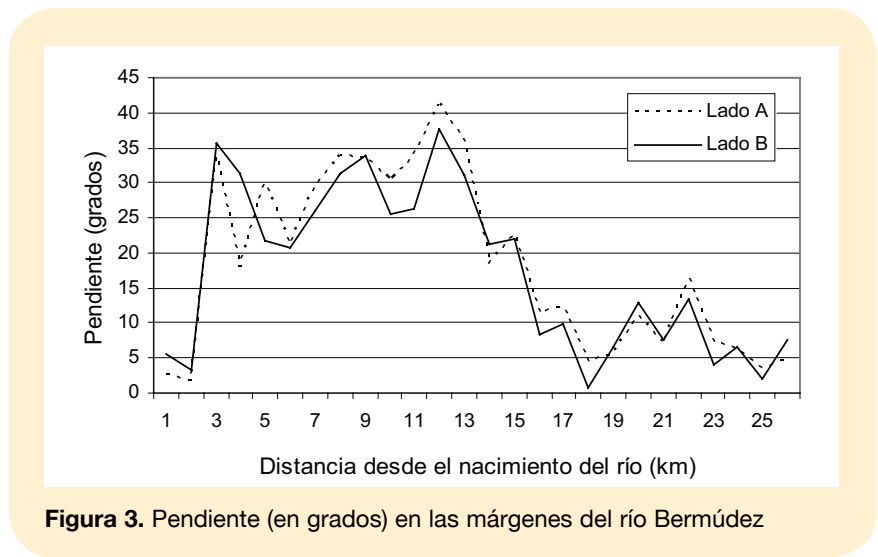


Figura 3. Pendiente (en grados) en las márgenes del río Bermúdez

Esta porción corresponde a una zona de transición, tanto con relación al uso del suelo como en la reducción gradual de las pendientes. Conforme las pendientes disminuyen, los cafetales se reducen y los pastos reaparecen, pero esta vez en forma de jardines y campos recreativos en áreas residenciales. La urbanización es más fuerte sobre la margen derecha.

Segmento 4

Parte baja del río, kilómetros 19 al 21. Los dos lados siguen siendo diferentes. Del lado izquierdo podemos observar un incremento abrupto del área de pastos que alcanza un 60%. Paralelamente desaparecen los cultivos, mientras que la cobertura de suelo desnudo, la urbanización y los charrales bajan. Del lado derecho, los pastos aumentan (25%), mientras que el café desaparece y los charrales bajan (15%). Se pudo notar un pequeño aumento de la urbanización (26%).

Segmento 5

Parte baja del río, kilómetros 22 al 26. La margen izquierda muestra una fuerte baja en el área ocupada

por pastos (20%), mientras que los charrales (35%) y el suelo desnudo (15%) aumentan de nuevo. Estos kilómetros se caracterizan también por la reaparición de los cultivos (5%). La urbanización se mantiene con una tasa de 10%. Del lado derecho, observamos también una reaparición de los cultivos (5%) y un aumento en el porcentaje de suelo desnudo (18%), mientras que la urbanización cae a 12%.

En esta parte aparecen cultivos anuales tales como culantro (*Coriander sativum*), repollo (*Brassica oleacea*), tomate (*Lycopersicon esculentum*) y maíz (*Zea mays*). La urbanización se concentra alrededor del eje de carreteras entre San Vicente y San Rafael de Alajuela. El río se aleja poco a poco de este eje, lo que explica la baja de la urbanización del lado derecho. De los dos lados, podemos observar un porcentaje relativamente alto de charrales y suelo desnudo, esta última proveniente de la quema de los charrales.

Como se observa, las coberturas de árboles, charrales, cultivos y suelo desnudo a un lado del río son casi la imagen especular de lo

que ocurre en el lado opuesto. Sin embargo, aguas abajo la margen derecha se encuentra un poco más urbanizada que la margen izquierda que en cambio tiene más pastos.

Capacidad de las márgenes para reducir la erosión (CM)

En la Fig. 5 se presenta el cálculo de la CM para cada kilómetro a lo largo del río. Hasta el kilómetro 3, la capacidad de la margen izquierda para impedir la erosión (CM) es moderada debido al carácter rural de la zona, con presencia de pastos y bosques. Pero, conforme disminuye la elevación, aparecen zonas de cafetales mezcladas con suelo desnudo en pendiente fuertes, que tienen capacidades muy reducidas para impedir la erosión (promedio <3 entre el kilómetro 4 y el kilómetro 16). El aumento progresivo de áreas cubiertas por pastos causa un incremento de la CM, la cual alcanza valores superiores a 5 entre los kilómetros 18 y 21. Después, la presencia de charrales quemados estabiliza la CM en valores cercanos a 4.

El lado derecho se caracteriza también por una CM baja (cerca de 4 en promedio). No obstante, las variaciones de la CM a lo largo del río son menos pronunciadas que en el lado izquierdo. Hasta el kilómetro 17 las variaciones son parecidas. A partir del kilómetro 18 las márgenes tienen valores CM muy reducidos (promedio <3). El ligero aumento en el porcentaje de pastos y charrales hace que la CM suba un poco hasta el valor 4 y se estabiliza entre los kilómetros 18 y 26. En el kilómetro 25, la presencia más fuerte de pastos sube la capacidad hasta 5.

Los resultados indican que los factores que más influyen sobre la capacidad de las márgenes para impedir la erosión son: el grado de inclinación de la pendiente y la presencia de pastos. Existe una correlación positiva entre la cobertura de pastos y la CM en ambas márgenes del río (lado izquierdo: $r = 0.90$; p

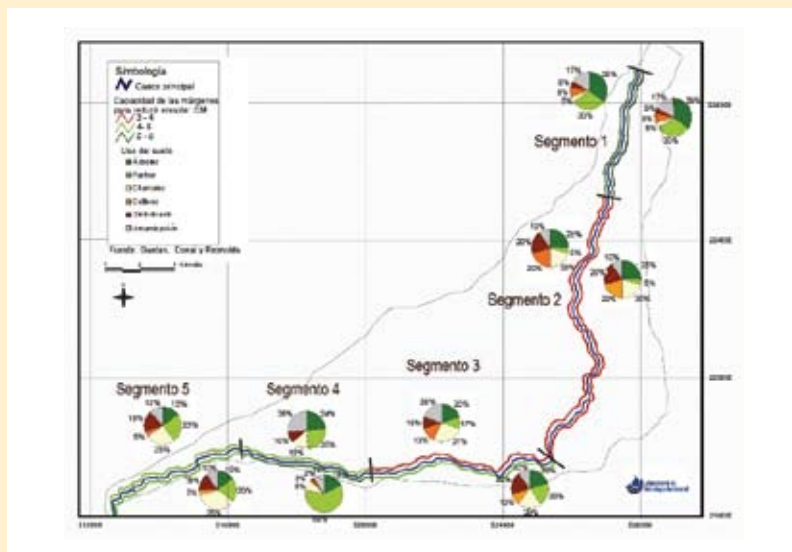


Figura 4. Uso del suelo (en porcentaje) y capacidad de las márgenes (CM) del río Bermúdez para reducir la erosión. Los cinco segmentos en que se ha dividido el río se analizan en el texto.

<0.01; lado derecho $r = 0.78$; $p < 0.01$). Por otra parte, hay una correlación inversa entre la pendiente y la CM (lado izquierdo: $r = -0.81$; $p < 0.01$; -lado derecho $r = -0.72$; $p < 0.01$).

Comparación entre la erosión observada y la capacidad de las márgenes para impedir la erosión (CM)

Se calcularon los coeficientes de correlación entre la intensidad de la erosión observada y la CM estimada. Se encontró una correlación muy alta a ambos lados del río: -0.911 ($p < 0.01$) para el lado izquierdo y -0.698 ($p < 0.01$) para el lado derecho. Esto indica que la CM estimada utilizando la fórmula propuesta es un parámetro válido.

Como se mencionó anteriormente las áreas de cafetales (kilómetros 4 al 17) tenían una capacidad relativamente baja para impedir la erosión. En efecto, existe una correlación significativa entre el café y la pendiente sobre el lado izquierdo ($r = 0.73$, $p < 0,05$) y una correlación alta, aunque no significativa, sobre el lado derecho ($r = 0.53$, $p < 0,05$). Esta baja capacidad natural de los cafetales está agravada por una tendencia a la ausencia de coberturas bajas que acompañen al café ($r_I = -0.6$, $p < 0,05$ y $r_D = -0.5$, $p < 0,05$) que dejan sitio a la tierra desnuda (correlación pastos – tierra desnuda = -0.71 en el lado A).

Contaminación de las aguas por desechos líquidos y sólidos

Se pudieron observar cerca de 180 puntos de descargas líquidas y más de 70 sitios dedicados a la descarga de desechos sólidos a lo largo del río, tanto de origen doméstico como industrial y agrícola. No existe una correlación importante entre el porcentaje o la densidad de urbanización y el número de puntos de descarga. Sin embargo, es probable que el número de puntos de descarga esté subestimado, ya que no siempre fue posible la observación y cuantificación directa de los mismos. Por

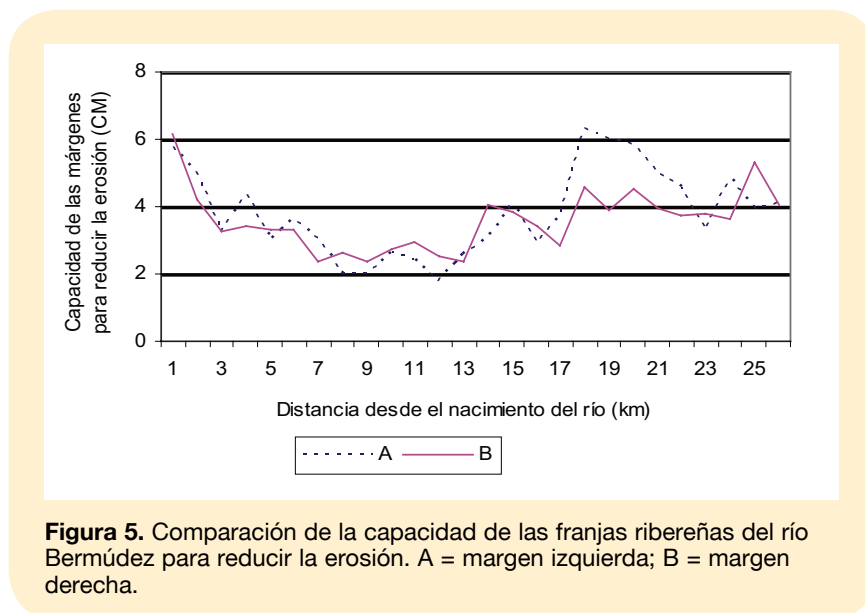


Figura 5. Comparación de la capacidad de las franjas ribereñas del río Bermúdez para reducir la erosión. A = margen izquierda; B = margen derecha.

otra parte, algunos puntos de descarga drenan las aguas domésticas de barrios ubicados fuera de los 50 metros correspondientes a la franja que se analizó. Así, la presencia de puntos de descargas en un lugar no siempre indica la presencia de urbanización en la zona evaluada.

Discusión y conclusiones

El análisis de los resultados permite concluir que la capacidad de las franjas ribereñas para impedir la erosión es relativamente baja a todo lo largo del río Bermúdez y que el uso del suelo en las franjas cercanas al río varía mucho sobre distancias a menudo muy cortas. Los valores de CM obtenidos fueron muy diferentes según los lugares. Esto puede explicarse en función de tres factores: a) la fuerte pendiente, b) la poca presencia de bosques protectores o pastos en las márgenes del río Bermúdez y c) la urbanización continua cerca de todo el lecho del río.

Es evidente que las prácticas actuales de cultivo del café en zonas de pendiente pueden favorecer los procesos erosivos. Como el factor pendiente no se puede modificar, es probable que si se acompaña el café con otro cultivo estacional que sirva de cobertura, como puede ser

el frijol (*Phaseolus vulgaris*), el chile dulce (*Capsicum annuum*) o cualquier otra herbácea, se consiga un incremento en el valor CM. Esto es particularmente importante en la zona marginal de 50 metros. Por otra parte, se hace necesario manejar adecuadamente las tierras bajo regeneración natural (charrales) y áreas de suelo desnudo. En la parte baja del río, la CM también se mantiene baja, debido principalmente a la presencia significativa de charrales quemados.

Es importante, pues, concentrar las acciones contra la erosión en las zonas que corresponden principalmente a cafetales en pendiente fuerte y a zonas bajo procesos de regeneración natural o charrales. Trabajar con los agricultores para reemplazar la asociación tierra desnuda/café por una asociación estrato herbáceo/café podría ser una solución. La quema de los charrales, considerado como un proceso de limpieza de terreno rápido y de bajo costo, constituye una forma de manejo inadecuado, que más bien favorece la erosión y la contaminación del río. Las quemadas periódicas, accidentales o provocadas, impiden la formación de un sistema de raíces denso y relativamente profundo y provoca igualmente la permanencia de suelo desnudo. Métodos de

manejo alternativos de áreas de charral deberían ser evaluados y recomendados a los agricultores.

Es probable que la contaminación difusa por sedimentos derivada de procesos erosivos sea poco significativa si se la compara con la contaminación directa por desechos líquidos y sólidos provenientes de las zonas urbanas. La urbanización no planificada en áreas cercanas al río parece ser responsable directa de gran parte de la contaminación ya que un alto porcentaje de las aguas domésticas son drenadas hacia el lecho del río. La presencia de puntos de descarga de desechos líquidos, observados a todo lo largo del cauce, revela un manejo deficiente de las aguas negras, además del hecho de que no existe alcantarillado sanitario vinculado a plantas de tratamiento en toda la cuenca. Es por esto que se hace urgente realizar acciones para mejorar el sistema de recolección y de tratamiento de las aguas servidas y los mecanismos de manejo de desechos sólidos. Por otra parte, es probable que la relación funcional existente entre el río y el acuífero Barva pueda estar, especialmente en los sectores donde el río es influente al acuífero, contribuyendo al deterioro de las aguas subterráneas, actualmente utilizadas por la población de diversas localidades de la provincia de Heredia y San José.

La urbanización está presente, en mayor o menor grado, a todo lo largo del río, e incluye desde zonas con casas y edificaciones aisladas en la parte superior del río hasta zonas de mayor densidad poblacional, en barrios populares o zonas residenciales. A pesar de que se sabe que el acceso a sistemas de recolección de desechos está a menudo vinculado con el nivel social del habitante o del barrio, en general se puede afirmar que el manejo de desechos, tanto sólidos como líquidos, es deficiente en toda la zona urbana o semiurbana cercana al río y que el efecto

contaminante de las edificaciones en las riberas de los ríos es significativo.

Además de la falta de conciencia de la población acerca del deterioro que sus propias actividades causan sobre las aguas, es evidente que la legislación no ha constituido una herramienta eficaz para inducir un manejo adecuado de los terrenos a las orillas de los ríos y para evitar las descargas de desechos. La construcción de un sistema de alcantarillado sanitario con plantas de tratamiento es la medida más urgente para evitar que continúe la contaminación de los ríos. La penalización de la actividad ilegal y la mejora en el sistema municipal de recolección de basuras son también medidas efectivas para impedir que continúe el deterioro de las aguas del río y de sus márgenes. Los autores consideran que la lucha contra la contaminación directa por descargas de desechos en el río tiene

que ser prioritaria y realizarse antes de cualquier acción contra la contaminación causada por procesos erosivos. Parecería poco lógico tratar de convencer a los agricultores de que modifiquen sus prácticas culturales, mientras que la situación al nivel de las descargas cloacales no se mejora.

Agradecimientos

El presente proyecto fue realizado con financiamiento proveniente del Laboratorio de Hidrología Ambiental de la Universidad Nacional (UNA). Se agradece la colaboración de la Lic. Ivette Inostroza, Directora de la Escuela de Ciencias Biológicas de la UNA y del señor Julio Fraile, del Laboratorio de Hidrología Ambiental. Asimismo, los autores agradecen los comentarios y sugerencias proporcionadas por revisores anónimos.

Literatura citada

- Castro, L. Fraile, J; Reynolds Vargas, J. 1996. Conductividad, oxígeno disuelto, pH y temperatura en el río Bermúdez (Costa Rica) y su relación con el uso del suelo en la cuenca. *UNICIENCIA* 13:27-34.
- Cervantes, C; Vahrson, WG. 1991. Características de los suelos y pérdidas de nutrientes en Cerbatana de Puriscal, Costa Rica. *In* Memorias de Taller sobre Erosión de Suelos. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. p. 131-143.
- Dercksen, PM. 1991. A soil erosion mapping exercise in Costa Rica: Purposes, methodology, and results. *In* Memorias de Taller sobre Erosión de Suelos. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica . p 164-169.
- Dunne, T; Dietrich, W. 1982. Sediment Sources in Tropical Drainage Basin. *In* Soil Erosion and Conservation in the Tropics. Madison, WI, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. p. 41-55. (ASA Special Publication no. 43).
- FAO. 1967. La erosión del suelo por el agua. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 207 p. (Cuadernos de Fomento Agropecuario N° 81).
- Forsythe, WM. 1991. Algunas prácticas culturales y la erosión en Costa Rica. *In* Memorias de Taller sobre Erosión de Suelos. Universidad Nacional de Costa Rica. p. 171-179.
- Holdridge, LR. 1982. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). San José, CR. 216 p.
- IGN. 1990. Hojas Cartográficas 1:10000. Instituto Geográfico Nacional (IGN). San José, CR.
- IMN. 2005. Archivos de Precipitación del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). San José, Costa Rica.
- La Gaceta (Costa Rica). 1942. Ley No. 276. Ley General de Aguas. Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica.
- _____. (Costa Rica). 1961. Ley No. 2825, Ley de Tierras y Colonización. Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica.
- _____. (Costa Rica). 1996. Ley No. 7575, Ley Forestal. Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica.
- Marsh, WM. 1997. Landscape Planning: Environmental Applications. Third Edition. John Wiley & Sons.
- Reynolds Vargas, J. 1996. Las aguas subterráneas en Costa Rica: Un recurso en peligro. *In* Utilización y Manejo Sostenible de los Recursos Hídricos. Editorial FUNA, Heredia, CR. p. 157-165.
- Sánchez, AM; Alvarez, GP. 1991. Aplicación de la EUPS a nivel de una microcuenca: El caso de la quebrada Pital. Puriscal. *In* Memorias de Taller sobre Erosión de Suelos. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. p. 144-163.
- UNEP. 1994. The pollution of lakes and reservoirs. Nairobi, Kenya, UNEP Environmental Library No. 12. p. 35.
- Winter TC; Judson, WH; Franke, OL; Alley, WM. 1998. Ground Water and Surface Water A Single Resource. Denver, Colorado, U.S.A, U.S. Geological Survey Circular 1139.