

Escenarios de erosión en la cuenca del río Coyolate

Erosion scenarios in the Coyolate River watershed

Mynor Roberto Estrada Méndez 

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos,
Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala
Dirección para recibir correspondencia: mynoresmen@gmail.com

Recibido: 10/01/2022 Aceptado: 28/11/2022

Resumen

La cuenca del río Coyolate es de importancia económica y ecológica para Guatemala, en esta se producen los cultivos con mayor aporte al PIB nacional siendo estos la caña de azúcar, maíz, banano, café y hule entre otros. El estudio generó tres escenarios de erosión hídrica utilizando cuatro niveles de erosión nula a ligera, moderada, fuerte y muy fuerte, que corresponden a tasas de erosión menor a 10, de 10 a 50, de 50 a 200 y mayor a 200 toneladas por hectárea anuales. En este se determinó la intensidad de uso de los suelos de la cuenca, comparando su capacidad de uso con su uso actual utilizando el modelo USLE para el cálculo de la erosión hídrica. Los escenarios presentaron las siguientes coberturas: a) 96% agricultura, 1.5% bosque y 2.5% otros usos; b) 65% agricultura, 28% bosque y 7% de otros usos; y c) 69% agricultura, 29% bosque y el 2% otros usos. El estudio concluyó que una de las principales causas de la erosión hídrica en la cuenca del río Coyolate es el uso inadecuado de sus suelos sin tomar en cuenta su capacidad de uso y características geomorfológicas. Se encontró que, aunque se incrementara el área para agricultura, una adecuada distribución de uso generaría menor erosión hídrica. Para mitigar la erosión hídrica en la cuenca, se debe mejorar su gestión, adecuando el uso de sus suelos e implementando prácticas para su conservación.

Palabras claves: intensidad de uso de suelo, agricultura, sistemas de información geográfica, modelo hidrológico, cobertura de suelo, USLE.

Abstract

The Coyolate river basin is of economic and ecologic importance for Guatemala, where the crops that contribute most to the national GDP are produced: sugar cane, corn, bananas, and coffee, beans, and rubber among others. The study generated three water erosion scenarios using four levels of zero to light, moderate, strong, and very strong erosion, corresponding to erosion rates of less than 10, 10 to 50, 50 to 200, and greater than 200 tons per hectare per year. The intensity of use of the soils in the basin was determined by comparing their use capacity with their current use using the USLE model for calculating water erosion. The scenarios presented the following coverages: a) 96% agriculture, 1.5% forest and 2.5% other uses; b) 65% agriculture, 28% forest and 7% other uses; and c) 69% agriculture, 29% forest and 2% other uses. The study concluded that one of the main causes of water erosion in Coyolate river basin is the inadequate use of its soils without considering their use capacity and geomorphological characteristics. It was found that even if the area for agriculture is increased, adequate use distribution would generate less water erosion. To mitigate water erosion in the watershed, its management must be improved, adapting the use of its soils, and implementing conservation practices.

Key words: land use intensity, agriculture, geographic information systems, hydrological model, land cover, USLE.



Introducción

La cuenca del río Coyolate es de importancia económica y ecológica para Guatemala, abarcando desde la costa sur en la vertiente del pacífico, hasta la parte baja de occidente. En su amplia extensión presenta variaciones de altitud y diversidad de especies de flora y fauna, con riqueza en recursos hídricos y fertilidad en sus suelos de los cuales dependen miles de personas. En ella se realizan diversas actividades agroindustriales presentando grandes extensiones de cultivos de alta importancia económica para el país como la caña de azúcar, el banano y el café (Santos Pérez, 2014). Actualmente la cuenca se ve amenazada por distintos factores causados por una inadecuada gestión, siendo la erosión hídrica una de las principales.

La cuenca está ubicada dentro de los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez y Chimaltenango, abarcando los municipios de Santa Apolonia, Tecpán, Patzún, Patzicía, San Andrés Iztapa, Acatenango, Pochuta, Alotenango, Yepocapa y Siquinalá como se muestra en la figura 1. La Comisión Nacional de Riesgos y Desastres – CONRED - (2007) estimó que en el 2007 los ingresos directos de sus pobladores eran en promedio entre Q1,500.00 y Q2,500.00, en época seca y entre Q450.00 y Q600.00 en época lluviosa.

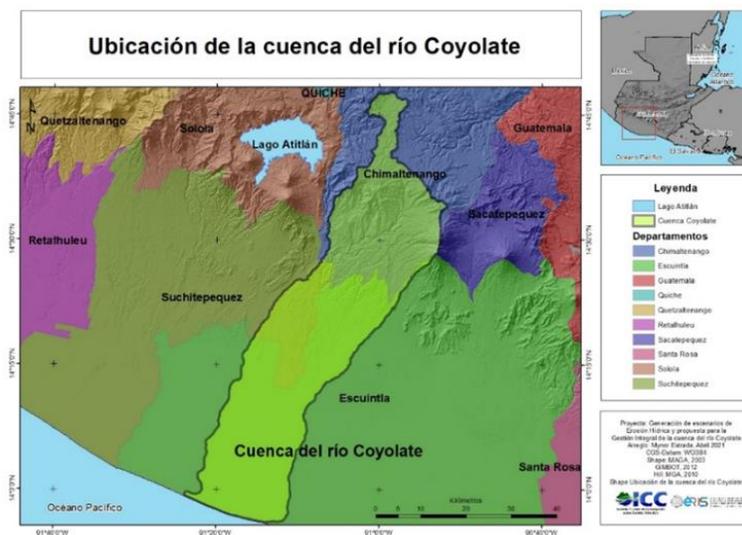
La cuenca se origina en la Sierra Madre aproximadamente en las coordenadas 14°27' latitud norte 91°5' longitud oeste y 13°57' latitud norte 91°18' longitud oeste desembocando en el Océano Pacífico (Fuentes Montepeque, 2008). Esta pertenece a la vertiente del pacífico con ríos de longitudes promedio de 110 kilómetros cuadrados originados a una altura media de 3000 metros sobre el nivel del mar con pendientes entre 10% y 20% que cambian drásticamente en las planicies costeras volviéndolas susceptibles a inundaciones. La cuenca se integra por las subcuencas San Cristóbal, Coyolate, Nicán y Xayá; y las microcuencas Pantaleón, Coyolate, Xayá, Nicán, Xatá y Mescalate. El área aproximada de la cuenca es alrededor de 1,680 kilómetros cuadrados (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [MAGA], 2009). Según Santos Mansilla (2010) entre sus aspectos morfológicos encontramos los mencionados en la tabla 1.

Tabla 1: Aspectos morfológicos de la cuenca

Aspecto Morfológico	Resultado
Longitud total de corriente	2,250 km
Radio de bifurcación medio	4 (adimensional)
Radio de longitud medio	2 km
Longitud de cause principal	150 km
Relación de forma	0.08
Relación circular	0.30 km

Fuente: Santos Mansilla (2010).

Figura 1: Ubicación de la cuenca del río Coyolate.



Fuente: (Maga 2003)

La mayor parte de sus suelos son utilizados para la agricultura, representando más del 14% del aporte de la agricultura al PIB país y el 60% de las exportaciones agrícolas (Instituto de Investigación en Ciencias Naturales y Tecnología de la Universidad Rafael Landívar [IARNA], 2021). En ella se producen los cuatro cultivos con mayor aporte al PIB nacional siendo estos la caña de azúcar, maíz, banano y café, además de otros como aceite de palma, frijol y hule.

Los recursos de la cuenca son utilizados por las comunidades aledañas de los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez y Chimaltenango, siendo la fuente principal del recurso hídrico para más de 50 comunidades (Santos Pérez, 2016).

Para desarrollar propuestas de mejora en la gestión integral de la cuenca a través del control de la erosión, el estudio analizó la tasa de pérdida de suelo anual a través del modelo de la ecuación de pérdida universal del suelo – USLE - (Stone & Hilborn, 2015). Este modelo considera los efectos de factores como la precipitación, la topografía y la cobertura del suelo (Kim et al., 2005). La investigación se realizó en conjunto con el Instituto de Cambio Climático de Guatemala [ICC] quienes proporcionaron información esencial como los resultados de análisis de suelos realizados anteriormente en más de 2,000 puntos a lo largo de la cuenca e información de la temperatura y precipitación multianual en ella en el período del año 2014 al 2020. A pesar de que se habían realizado extensos estudios de pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Coyolate utilizando el modelo USLE, la investigación permitió generar información actualizada.

La investigación presenta tres escenarios de erosión dentro de la cuenca. El primero, toma en cuenta la cobertura actual y factores físicos como la pendiente, la textura de sus suelos y su extensión. Seguidamente, se describe un escenario donde se reemplazó la cobertura boscosa por agricultura anual. Finalmente se presenta un escenario con mejoras en las prácticas agrícolas adaptándolas a la capacidad de uso del suelo e incrementando la cobertura boscosa.

Para realizar el estudio se utilizó información de 21 estaciones del ICC, distribuidas a lo largo de la cuenca en el período del 1 de enero del 2014 al 31 de

diciembre del 2020. El estudio identificó una temperatura media anual 25°C y una precipitación media multianual entre 800 y 4600 mm/año. Los suelos dentro de la cuenca presentaron 6 tipos de clasificaciones taxonómicas siendo los principales, 35% andisoles suelos de origen volcánico, de color negro, alta porosidad, alto contenido de materia orgánica y profundos (Sánchez Espinoza & Rubiano Sanabria, 2015). De mayor a menor abundancia también presenta molisoles, inceptisoles, entisoles, ultisoles y alfisoles (Maga, 2003). Más del 50% de los suelos de la cuenca poseen textura franca arenosa y del porcentaje restante aproximadamente el 27% es de alguna variación de textura franca, características texturales idóneas para la agricultura.

Existe gran variación en la cobertura de la cuenca, más de un cuarto del área total está cubierta por el cultivo de caña de azúcar, abarcando la mayoría de la parte baja y ocupando un elevado porcentaje del territorio del departamento de Escuintla. La diferencia que existe entre los distintos cultivos dentro de la cuenca complica el control de la tasa de erosión al ser necesaria la implementación de diversas técnicas de uso y conservación de suelo. La mayor parte de sus ríos nacen en la parte alta y desembocan en la zona costera donde las pendientes son mínimas, volviéndolas susceptibles a inundaciones, contrastando con las partes altas donde se observan ríos con un promedio entre el 10% y 20% de pendiente.

La clasificación de Holdridge indica 11 zonas de vida ecológicas en la cuenca que incluyen “bosque muy húmedo subtropical”, “bosque pluvial subtropical” y “bosque pluvial montano bajo subtropical” (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 1981).

Materiales y método

Erosión de los suelos

La erosión es el proceso natural mediante el cual se desprenden fragmentos de roca o suelo siendo esencial en la formación del suelo (FAO, 1992). La intensidad de la erosión hídrica en una cuenca se ve afectada por distintos factores tales como la pendiente, el tipo de suelo, la capacidad de almacenamiento de agua del

suelo, la naturaleza de la roca subyacente, la cubierta vegetal y la intensidad y el período de las precipitaciones (McIvor, Youjun, Daoping, Eyle, & Pu, 2014). Para el estudio se utilizó la clasificación de la tabla 2 para medir su intensidad elaborada por FAO (1981) y citada por ICC (2020).

Tabla 2: Niveles de erosión hídrica de acuerdo con la tasa de erosión

Nivel de erosión	Tasa de erosión (t/ha/a)
Nula a ligera	< 10
Moderada	10 – 50
Fuerte	50 – 200
Muy fuerte	> 200

Fuente: FAO (1981), citada por ICC (2020).

Capacidad de uso del suelo

La capacidad de uso, la cual indica el uso adecuado de los suelos, fue generada en base a una capa de información geográfica nacional proporcionada por el ICC, en la cual se indica que dentro de la cuenca existen tres regiones naturales, perteneciendo la parte alta a las Tierras Altas volcánicas, la media a Tierras Volcánicas de la Bocacosta y la parte baja a Tierras de la Llanura Costera del Pacífico. A continuación, se indican los porcentajes de cada una de las 8 áreas de capacidad dentro de la cuenca, organizadas en la tabla 3.

Tabla 3: Capacidad de Uso del suelo de Coyolate

Capacidad de uso	Área (km ²)	Porcentaje
Tierras forestales de protección (Fp)	31	2%
Áreas protegidas	33	2%
Agroforestería con cultivos permanentes (Ap)	63	3%
Sistemas silvopastoriles (Ss)	119	7%
Tierras forestales de producción (F)	152	8%
Agricultura con mejoras (Am)	280	16%
Agroforestería con cultivos anuales (Aa)	423	24%
Agricultura sin limitaciones (A)	580	38%

Fuente: ICC (2021).

Intensidad de uso del suelo

Esta variable es una forma de medir el grado de intervención antropogénica en el suelo, basándose en los distintos usos que se le da, principalmente aquellos agrícolas, al comparar su uso actual con su capacidad

de uso. Esta se divide en las categorías sobre utilizado identificada en rojo, uso correcto en verde, y subutilizado en amarillo. Después de obtener la capacidad de uso se comparó con el uso actual dándonos la intensidad representada en la tabla 4.

El grado de intensidad de uso de los suelos es variable en la cuenca, siendo que, el 12% de estos no se usan correctamente, el 85% tienen un uso correcto y el 3% restante es sobre utilizado.

Tabla 4: Intensidad de uso relacionando cobertura con capacidad de uso

Uso Actual	A	Am	As	Ss	Ap	F	Fp
Agua	Verde						
Agricultura anual	Verde						
Arboles dispersos	Amarillo						
Banano y plátano	Verde						
Bosque	Verde						
Café	Verde						
Caña de azúcar	Verde						
Cultivos permanentes arbóreos	Verde						
Cultivos permanentes herbáceos	Verde						
Espacios abiertos, sin o con poca vegetación	Amarillo						
Hule	Verde						
Aceite de palma	Verde						
Pastizales	Verde						
Vegetación arbustiva baja (guamil-matorral)	Amarillo						
Zonas agrícolas heterogéneas	Verde						
Zonas húmedas	Verde						

Modelo USLE

La ecuación básica del modelo USLE (ver ecuación 1) es la siguiente (FAO, 1992):

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

El factor R promedio de las estaciones del ICC analizadas para el estudio fue brindado por personal del ICC quienes lo habían calculado con anterioridad, utilizando un periodo de tres años (2017, 2018 y 2019) en 8 estaciones como se detalla en la tabla 5.

Tabla 5: Valores R promedio por estación.

Estación	Valor R Promedio (mm/ha/a)
El Platanar	3,987
Cengicaña	41,604
El Balsamo	41,278
Tehuantepec	15,807
Bonanza	11,105
San Antonio del Valle	9,671
Puyumate	17,439
Cocales	43,955

Fuente: ICC (2021)

Este factor R se determinó a través de información meteorológica de la red de estaciones meteorológicas del ICC, las que registran la precipitación cada 15 minutos. Este factor se obtuvo en función de la intensidad máxima de lluvia en 30 minutos consecutivos y la energía cinética por evento de lluvia. Finalmente se realizó una interpolación a través de Arc Gis 10 utilizando la técnica de co-krigin para tener un valor estimado de R a lo largo de la cuenca.

Para el cálculo del factor K se utilizó información de los suelos de la cuenca como el porcentaje de materia orgánica, arena, arcilla y limo; así como la estructura y la permeabilidad como sugiere Cooper (2011). Esta información se obtuvo de los estudios semidetallados realizados en los departamentos de Sacatepéquez, Chimaltenango y Guatemala por el MAGA y de análisis de suelos realizados por el laboratorio agronómico de CENGICAÑA entre los años 2015 y 2019.

Después se utilizó la ecuación elaborada por Wischmeier y Smith (1978), citados por ICC (2020) para estimar el factor K, según se muestra en la ecuación 2 siguiente.

$$K = \frac{0.00021 * (12 * MO) * M^{1.14} + 3.25 * (S - 2) + 2.5 * (P - 3)}{100} \quad (2)$$

Donde:

MO: Porcentaje de materia orgánica de la capa superficial del suelo

M: (% limo + % arena) * (100 - % arcilla)

S: clase de estructura, se obtiene de la tabla 6 basada en la textura de los suelos

P: Permeabilidad

Tabla 6: Valor de S de acuerdo con la textura del suelo.

Textura	Estructura	S
Arcilloso – arcilloso limoso	Gránulo muy fino y grumo fino	1
Francos	Gránulo y grumo finos	2
Arenosos	Gránulo medio y grueso; grumo medio	3

Fuente: ICC (2021)

La permeabilidad (P) se obtiene en base a la textura de los suelos, al igual que el valor del factor S, utilizando la tabla 7, elaborada por FAO (1981) y citada por ICC (2021).

Tabla 7: Valor de P de acuerdo con la textura del suelo.

Textura	Permeabilidad P (adimensional)
Arcillosos	6
Arcillo limoso	5
Franco	4
Franco arenoso	3
Arenoso (Infiltración rápida)	2
Arenoso (Infiltración muy rápida)	1

Fuente: FAO (1981) citada por ICC (2021)

Los valores obtenidos de K fueron ajustados con 0.1317 como un coeficiente de conversión de unidades del sistema inglés al sistema métrico, propuesto por Foster et al. (1981) y citado por el ICC (2020).

Finalmente se ordenó la información en un documento de Excel y se sustituyeron los valores en la forma para obtener los valores de K.

El factor L es la proporción de pérdida de suelos a lo largo de la pendiente de la cuenca. Para este factor se utilizó el Modelo de Elevación Digital (DEM) nacional con una resolución de 15 x 15 metros. Después se generó un mapa de la pendiente (el valor α) el cual se multiplico por 0.01745 para su conversión a radianes.

El factor L se determinó utilizando la siguiente formula por medio de la calculadora ráster de ArcMap 10.501® de ESRI:

$$L = \frac{(A + D^2)^{m+1} - A^{m+1}}{x^{m+1} * D^{m+2} + 22.13^m} \quad (3)$$

Siendo:

A: el área aportada unitaria a la entrada de un píxel (flujo acumulado)

D: es el tamaño del píxel (en este caso 15)

X: es el factor de corrección de forma. Al ser calculado utilizando sistemas de información geográfica el valor será de 1 según lo indica Castro Quintero, Lince Salazar, & Riaño Melo (2017).

m: factor relacionado a la pendiente la cual se obtiene con la ecuación 4:

$$m = \frac{f}{1+f} \quad (4)$$

Para calcular f de la ecuación anterior, se utilizó la ecuación 5:

$$f = \frac{\sin(\beta/0.08696)}{3 \times \sin(\beta/0.08696)^{0.8} + 0.56} \quad (5)$$

Seguidamente, con la capa generada de pendientes en radianes se calculó la dirección del flujo (Df) y la acumulación del flujo (Af).

El ángulo corresponde a un ráster de pendiente del área a evaluar en grados brindado por el ICC.

El factor S es el factor de magnitud de la pendiente, el cual representa la cantidad de erosión del suelo con un espacio de pendiente específica. Para calcularlo se utilizaron los siguientes criterios:

$$S = 10.8 \sin \alpha + 0.03 \quad \text{si} \quad \tan \alpha < 0.09$$

$$S = 16.8 \sin \alpha - 0.5 \quad \text{si} \quad \tan \alpha \geq 0.09$$

Al obtener los valores de S se procedió a utilizar la fórmula de Moore y Bruch (1986) citada por el ICC (2020) en la calculadora ráster para el cálculo del factor LS mostrada a continuación.

$$LS = \text{Factor L} * \text{Factor S} \quad (6)$$

El factor de cobertura y manejo (factor C) representa la cantidad de pérdida de suelo en una superficie con cobertura y manejo específico. El cálculo de este factor se realizó relacionando la capa de tipo de cobertura de los suelos de la cuenca con los valores de la tabla 8.

El factor P representa las prácticas de conservación para mitigar la pérdida por erosión, tales como barreras vivas o la labranza en el sentido de la

pendiente. El factor P se eligió al relacionar las variables de pendiente, tipo de cultivo e intensidad de uso de los suelos. Para la obtención de este valor se utilizó la metodología utilizada por el ICC (2021) la cual propone cuatro técnicas de conservación de acuerdo con la pendiente del área, dándonos los valores observados en la tabla 9.

Tabla 8: Valor de C de acuerdo con la textura del suelo.

Cobertura	Factor C (valores promedio) (adimensional)	Referencias bibliográficas del documento del ICC
Agricultura anual	0.55	Gonzales, C. y Pozo, G. 2007
Árboles dispersos	0.34	Lianes, E. et al. 2009; Gonzales, C. y Pozo, G. 2007
Banano - plátano	0.06	Lianes, E. et al. 2009; Gonzales, C. y Pozo, G. 2007
Bosque	0.01	FAO, 1979; Gaspari, F. et al. Sf.; Dumas, A. 2012; Lianes, E. et al. 2009; Gonzales, C. y Pozo, G. 2007
Café	0.07	Lianes, E. et al. 2009; Gonzales, C. y Pozo, G. 2007; Mitchell y Bubbenzer, 1980
Caña	0.23	Cooley y Williams, 1985; Uribe, C. 2012; Ibáñez, S. et al. 2012; Guzmán, I. 2012
Cultivos permanentes herbáceas	0.28	Gonzales, C. y Pozo, G. 2007
Cultivos permanentes arbóreos	0.13	Lianes, E. et al. 2009
Hule	0.10	Medina, C. 2009
Palma	0.20	Gonzales, C. y Pozo, G. 2007
Pastizales	0.08	Lianes, E. et al. 2009; Gonzales, C. y Pozo, G. 2007
Vegetación arbustiva baja	0.55	Gonzales, C. y Pozo, G. 2007
Zonas agrícolas heterogéneas	0.60	Gonzales, C. y Pozo, G. 2007

Fuente (ICC, 2021)

Tabla 9: Valores del factor P por pendiente.

Pendiente (%)	Cultivo a Nivel (adimensional)	Cultivo en fajas (adimensional)	Cultivo en terrazas de desagüe (adimensional)	Cultivo en terrazas de Infiltración (adimensional)
1 a 2	0.60	0.30	0.12	0.05
3 a 8	0.50	0.25	0.1	0.05
9 a 12	0.60	0.30	0.12	0.05
13 a 16	0.70	0.35	0.14	0.05
17 a 20	0.80	0.40	0.16	0.06
21 a 25	0.90	0.45	0.18	0.06
> 25	0.90	0.45	0.18	0.06

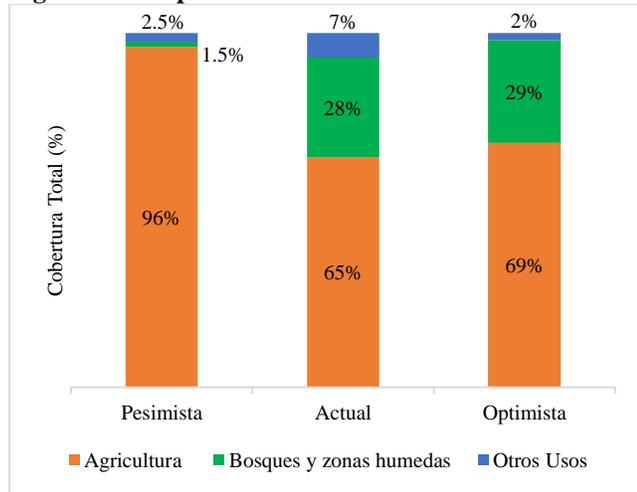
Fuente (ICC, 2021)

Resultados

Escenarios de erosión

Para estimar el impacto de la tasa de erosión hídrica dentro de la cuenca se elaboraron tres escenarios bajo condiciones de cobertura distintas con los porcentajes indicados en la figura 2:

Figura 2: Comparación de cobertura en cada escenario



Escenario de erosión actual

Para calcular dicho escenario se tomaron en cuenta los usos y coberturas actuales de la cuenca, siendo este el valor C actual, y se multiplicaron los datos de los factores K, L, S y R obtenidos previamente, dando como resultado la Figura 3.

Escenario de erosión pesimista

En este escenario se expuso el impacto que tendría la tasa de erosión dentro de la cuenca si la cobertura boscosa actual fuese sustituida en su totalidad por agricultura anual presentado esto en la figura 4.

Escenario de erosión optimista

En este escenario se adaptaron los suelos a su capacidad de uso, cambiando el tipo de cobertura e implementando prácticas de conservación, pero manteniendo las otras variables igual a los escenarios anteriores, resultando esto en el modelo de la figura 5.

Figura 3: Erosión hídrica actual en la cuenca del río Coyolate

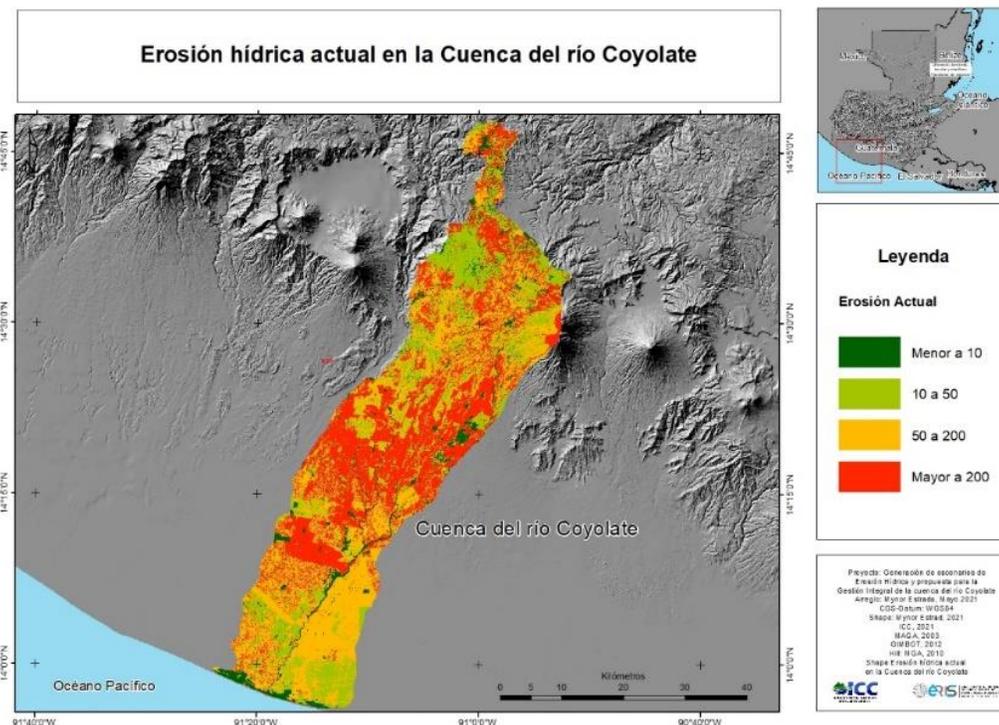


Figura 4: Erosión hídrica en escenario pesimista en la cuenca del río Coyolate

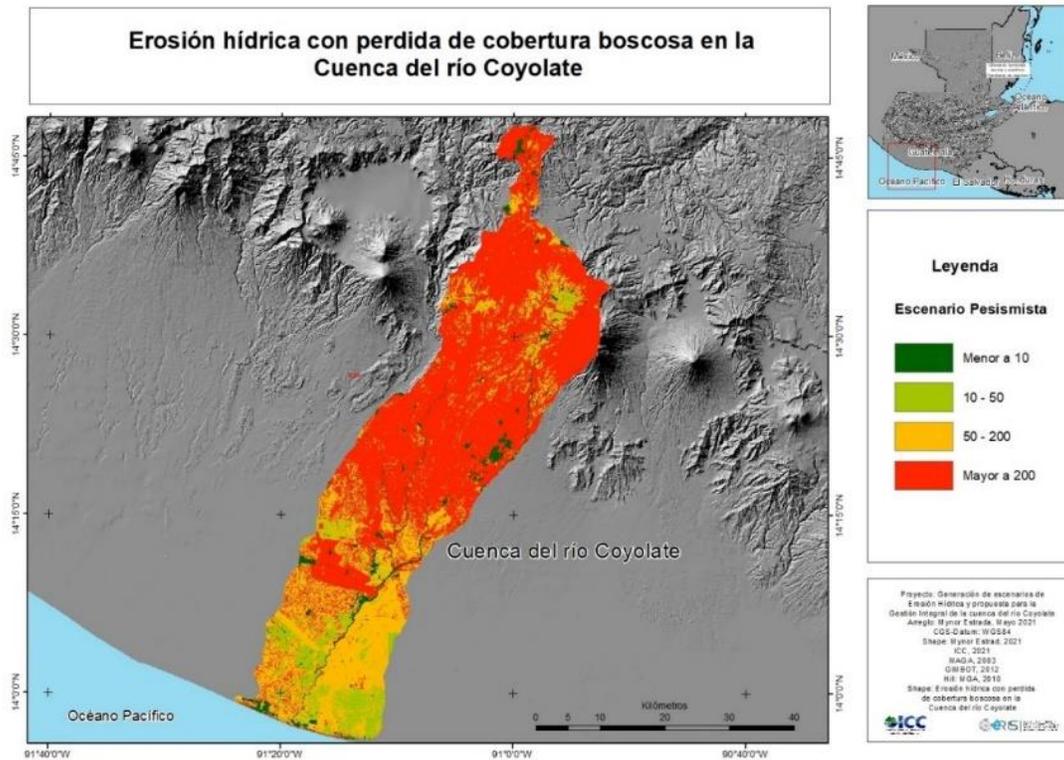
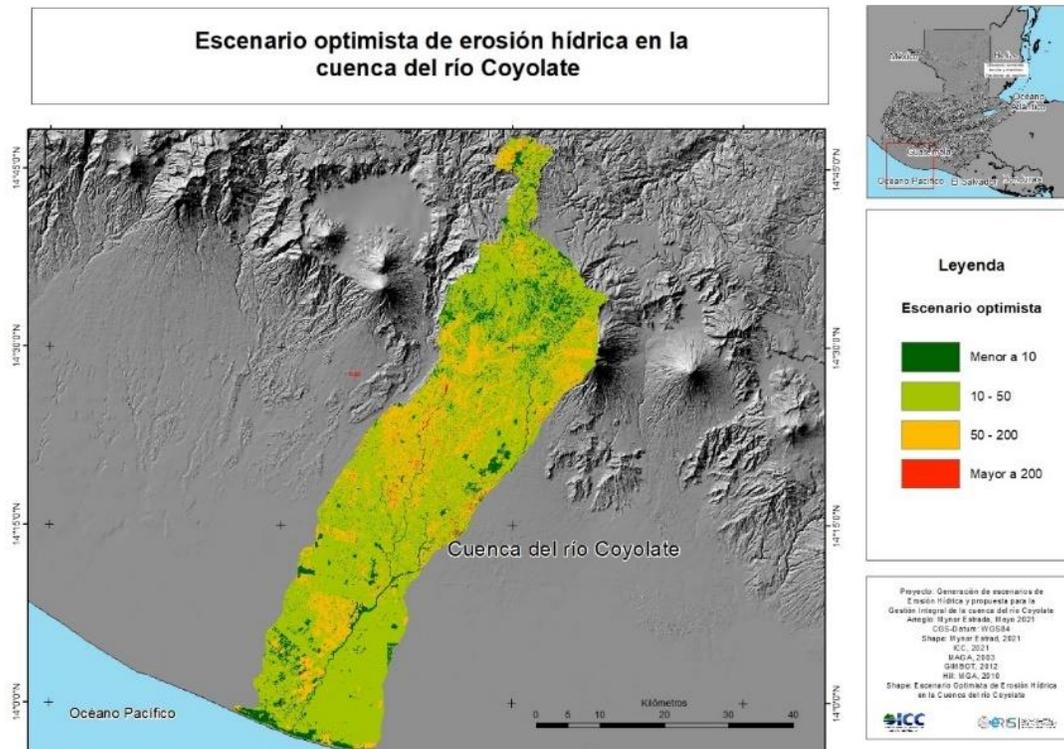


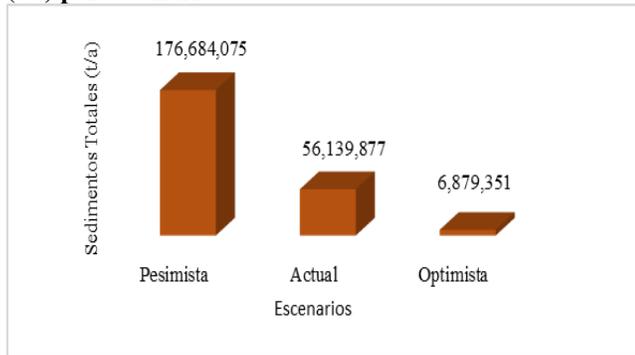
Figura 5: Erosión hídrica en escenario optimista en la cuenca del río Coyolate



Comparación entre escenarios

En la figura 6 se compara la cantidad de sedimento generado en cada escenario.

Figura 6: Comparación de generación de sedimentos (t/a) por escenario



Discusión de resultados

En la figura 3 se puede observar la erosión generada en los cuatro niveles de erosión, cuyo total de sedimentos fue de 56,139,877 toneladas anuales. Las dos categorías dentro de la cuenca que presentaron mayor erosión fueron las más altas, de 50 a 200 (t/ha) y mayor a 200 (t/ha), lo que equivale al 70% del área total.

Para una adecuada gestión de la cuenca, los valores deben de invertirse siendo las tasas de erosión bajas las predominantes. Vale la pena mencionar que menos del 6% de la cuenca presentó una erosión de nula a ligera, debido al amplio uso de sus suelos sin tomar en cuenta su capacidad de uso y a que el escenario no considero las prácticas de conservación de suelo.

La mayor parte de los sedimentos se generó en 1/3 del área de la cuenca mientras que los restantes 2/3 representan poco más del 15% del total de erosión. Esto evidencia la necesidad de un cambio en la distribución del uso de los suelos alineado con su impacto por la erosión sobre ellos, para disminuir los niveles de erosión encontrados en la cuenca. La mayoría de los sedimentos producidos en este escenario se deben a la agricultura, seguido por otros usos, siendo la cobertura boscosa la que menor cantidad genera.

Es importante mencionar que los otros usos, incluyen a los espacios abiertos donde se desarrolla la vegetación arbustiva baja y árboles dispersos que

ocupan menos del 5% del área de la cuenca. Estos generan gran cantidad de sedimentos debido a que la mayor parte de sus suelos están descubiertos tal y como se ha presentado en estudios previos como los de Sumiahadi et al. (2019) y Baets et al. (2011).

En la figura 4 se puede observar el incremento en la tasa de erosión respecto al escenario actual predominando las áreas con tasas de erosión mayores a 200 ton/ha. Este escenario generó un total de 176,684,075 toneladas de sedimentos anuales, más de tres veces la cantidad del escenario actual.

Este escenario muestra un nivel de erosión mayor a 200 ton/ha., en el 90% del área de la cuenca. Al compararlos con el uso actual, se produce un 20% más del total de los sedimentos en estos rangos y solamente el 4% presenta valores de erosión de nulos a ligeros.

El impacto de la pérdida de bosque es bastante visible en el modelo mostrado en la figura 4. La tasa donde se genera mayor cantidad de erosión es en la más alta donde se observa un cambio del 83% en el escenario actual a más del 96% en el pesimista. Estos resultados reflejan lo presentado por Santos Pérez (2014) en el impacto del uso de los suelos de la cuenca. El porcentaje restante es una cantidad depreciable equivalente a menos del 0.4% del total de la erosión en las tasas más bajas.

En la figura 5 se puede observar cómo disminuyó la tasa de erosión, siendo relativamente nulas las áreas con tasas mayores a 200 ton/ha. La mayor parte de la erosión se dio en niveles moderados y al sumarla con la tasa entre nula y ligera, más del 80% de la cuenca presenta niveles de erosión aceptables.

Es importante recalcar que el porcentaje de erosión en el rango muy fuerte fue menor al 1%, algo muy distinto al escenario actual donde se revierte la situación y más del 70% de la erosión se da arriba de las 50 toneladas anuales.

La mayor parte de los sedimentos, más del 90%, se generan en tasas de erosión entre 10 y 200 toneladas anuales, siendo la tasa de 10 a 50 la que mayor erosión presenta. Esto indica una erosión aceptable y refleja el impacto positivo de la adecuación del uso de los suelos y la implementación de prácticas de conservación como lo indica el ICC (2021).

La mayoría de los sedimentos se formaron en la cobertura de agricultura anual seguida por la cobertura boscosa. Sin embargo, aunque exista una diferencia del 1% entre los sedimentos generados por ellos se debe de tomar en cuenta el impacto de los otros tipos de agricultura cuya sumatoria es cercana al 70% de los sedimentos anuales. Otro detalle por destacar de la erosión generada por cobertura fue la diferencia en la cantidad de sedimentos producidos por las zonas agrícolas heterogéneas, las cuales cubren solo el 0.3% de la cuenca, pero cuyo incremento es una de las principales amenazas en la conservación de la cuenca lo cual refleja la importancia de una agricultura sostenible para el manejo de la erosión hídrica según lo expresa Montgomery (2007).

Como se puede observar en la figura 6, el cambio de uso de suelo tuvo un impacto notorio en la cantidad de sedimentos generados. En el escenario pesimista se presentaron 3 veces más sedimentos que en el actual mientras que en el optimista la cantidad se redujo 8 veces. A pesar del aumento en el porcentaje de agricultura en el escenario optimista, la erosión disminuyó 8 veces respecto al escenario actual.

Los resultados obtenidos por Gil Villalba (2017), indican que entre las principales causas de la erosión hídrica dentro de la cuenca encontramos la inadecuada distribución del uso de los suelos, observado en el incremento de erosión al disminuir la cobertura boscosa y la disminución de la misma al realizar una distribución apegada a la capacidad de uso, sin tomar en cuenta su capacidad de uso de acuerdo a sus características geomorfológicas y la falta de implementación de prácticas de conservación de suelo como cultivos a nivel, en fajas y en terrazas, coincidiendo con los resultados obtenidos en este estudio.

Conclusiones

Las características climáticas y biofísicas de la cuenca la vuelven ideal para la agricultura, por lo cual la mayor parte de sus suelos son destinados para este uso predominando el cultivo de caña de azúcar y de banano/plátano. En ella se presentan 9 zonas de vidas de Holdrige con una temperatura media de 25 °C y una amplia variación en la precipitación media multianual, entre 800 y 4600 mm de lluvia.

Los escenarios generados utilizando el modelo USLE demostraron variaciones en la cantidad de erosión producida por los cambios de cobertura. En el escenario actual, se encontró que en la mayor parte de la cuenca se presentan valores de erosión con pérdidas mayores a 200 toneladas por hectárea al año, sin embargo, se demostró en los distintos escenarios su variación de acuerdo con los cambios que se realicen en la cobertura del suelo.

En el escenario optimista, donde se propusieron cambios en el uso de los suelos y prácticas de conservación, se observó una disminución significativa de erosión presentando la mayor parte de la cuenca pérdidas entre 10 y 50 toneladas por hectárea al año. Mientras que en el pesimista se incrementó la erosión de la cuenca, con la mayor parte presentando niveles de erosión mayores a 200 toneladas por hectárea al año y triplicando la cantidad total de sedimentos anuales generados en el escenario actual.

La cuenca presenta suelos dentro de la clasificación de sobre utilizados, que generan cantidades significativas de sedimento. Para mitigar la erosión hídrica, se debe mejorar la gestión de la cuenca, adecuando el uso del suelo y la implementación de prácticas de conservación como cultivos a nivel, en faja y de terraza.

La pérdida de bosque genera una gran cantidad de sedimentos; si no se modera el avance de la frontera agrícola, las pérdidas anuales de suelo podrían triplicarse. En algunas áreas de la cuenca el cambio de uso de los suelos a uno agrícola puede contribuir a la mitigación de la erosión hídrica, siempre y cuando se realice de una manera sostenible, que tome en consideración las características fisicoquímicas de los suelos, no sustituya a la cobertura boscosa y se implementen las prácticas de conservación adecuadas.

Referencias

- Castro Quintero, A.F, Lince Salazar, L.A., & Riaño Melo, O. (2017). Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 17-26.
<https://doi.org/10.22490/21456453.1828>
- Comisión Nacional de Riesgos y Desastres [CONRED]. (2007). *Sistema de alerta*

- Temprana, Coyolate, Escuintla*. Escuintla. CONRED.
- Cooper, K. (2011). *Evaluation of the relationship between the Rusle R-Factor and mean annual precipitation*. Universidad Estatal de Colorado. https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/linkfiles/Cooper R-factor-Final.pdf
- De Baets, S., Poesen, J., Meersmans, J., & Serlet, L. (2011). Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. *CATENA*, 85(3), 237-244. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.009>
- Fuentes Montepeque, J. C. (2008). *Evaluación del sistema de alerta temprana para inundaciones, en la cuenca del río Coyolate*. [Tesis de Maestría, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0390_MT.pdf
- Gil Villalba, S. (2017). *Estudio hidrológico de la cuenca del río Coyolate*. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático [ICC]. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2017/07/Estudio-Hidrologico-Coyolate.pdf>
- Instituto de Investigación en Ciencias Naturales y Tecnología de la Universidad Rafael Landívar de Guatemala [IARNA]. (2 de noviembre 2021). *Agricultura*. IARNA. <http://www.infoiarna.org.gt/temas/agricultura/#:~:text=Datos%20clave,de%20az%C3%BAcar%20y%20el%20frijol>
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático [ICC]. (2020). *Estudio USLE, Cuenca del río Madre Vieja, Vertiente del Pacífico*. ICC. <https://icc.org.gt/es/documentos>
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático [ICC]. (2021). *Cálculo de USLE*. ICC. <https://icc.org.gt/es/documentos/>
- Kim, J., Saunders, P., & T Finn, J. (2005). Rapid Assessment of Soil Erosion in the Rio Lempa Basin, Central America, Using the Universal Soil Loss Equation and Geographic Information Systems. *Environmental Management* 36, 872-885. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-0065-z>
- McIvor, I., Youjun, H., Daoping, L., Eyles, G., & Pu, Z. (2014). Agroforestry: Conservation Trees and Erosion Prevention. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 208-221. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00247-3>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [MAGA]. (2009). *Mapa de cuencas hidrográficas a escala 1:50,000, República de Guatemala, método de Pfafstetter*. <https://www.maga.gob.gt/download/cuencas-hidro.pdf>
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *PNAS*, 104(33), 13268-13272. <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0611508104>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (1981). *Proyecto de evaluación de los recursos forestales tropicales*. FAO. <https://www.fao.org/3/ag293s/ag293s00.htm#TOC>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (1992). *Predicción de la erosión de suelos*. FAO. <https://www.fao.org/3/t2351s/t2351s03.htm>
- Sánchez Espinosa, J., & Rubiano Sanabria, Y. (2015). Procesos específicos de formación en Andisoles, Alfisoles y Ultisoles en Colombia. *Revista EIA*, 12(2), 85-97. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372015000300008
- Santos Mansilla, E. (2010). *Propuesta y validación de un método que genere modelos para establecer zonas vulnerables a desastres naturales en la cuenca del río Coyolate*. Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología de Guatemala. <https://fondo.senacyt.gob.gt/portal/index.php/catalogo/15-codigo/279-56-2006-medio-ambiente>
- Santos Pérez, A. (2014). *Estudio de la erosión hídrica en la parte alta de la zona cañera, microcuenca los Sujuyes, diagnóstico y servicios en el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático – ICC-, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala, C.A.* [Tesis de Licenciatura, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2016/10/Erosi%C3%B3n-H%C3%ADdricacompleto.pdf>
- Santos Pérez, A. (2016). *Riesgo potencial a erosión hídrica para la planificación del manejo y conservación de suelos de la agroindustria azucarera guatemalteca*. Instituto Privado de

Investigación sobre Cambio Climático [ICC].

<https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2016/10/USLE2016.pdf>

Stone, P. & Hilborn D. (2015). *Universal Soil Loss Equation (USLE)*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs of Ontario.

<http://omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-051.htm#t1>

Sumiahadi, A., Acar, R., Koç, N., & Özel, A. (2019). *The Potential Use of Cover Crops for Controlling Soil Erosion Caused by Water*. 10th International Soil Congress 2019 - Successful Transformation toward Land Degradation Neutrality: Future Perspective.

https://www.researchgate.net/publication/334119687_The_Potential_Use_of_Cover_Crops_for_Controlling_Soil_Erosion_Caused_by_Water