

Evaluación del potencial de mitigación de las estrategias de adaptación implementadas en los Territorios Sostenibles Adaptados al Clima (TeSAC)

Sandra Loaiza¹, Mayesse Da Silva ¹

¹ Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Palmira, Colombia; s.p.loaiza@cgiar.org (S.L.); m.a.dasilva@cgiar.org (D.M)

Resumen

El propósito de este estudio fue identificar el patrón espacial de la erosión hídrica del suelo actual y potencial y determinar el efecto de las condiciones de clima (precipitación), cobertura, prácticas de conservación e implementación de estrategias de adaptación al cambio climático para la zona de estudio delimitada en el municipio de Popayán – Colombia y en el departamento de Matagalpa – Nicaragua, por medio de la ecuación de pérdida de suelo (USLE), la cual se rige por cinco factores: Factores de erosión del suelo (K), índice de erosión de lluvia y escurrimiento (R), cultivo/vegetación y factor de manejo (C), factor de prácticas de conservación (P) y factor topográfico (LS). Donde se logró identificar que el efecto de la cobertura de suelo y las estrategias de adaptación a largo plazo son un factor importante como medida de conservación del recurso suelo.

Palabras claves: Ecuación Universal de Pérdida de suelo (USLE), erosión hídrica, cobertura y manejo de la vegetación, suelos.

1. Introducción

La erosión del suelo por acción del agua (erosión hídrica), es un proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas del suelo causado por la acción del agua que disminuye la productividad de los suelos y afecta la salud de los ecosistemas (Gaitán et al., 2017), este tipo de erosión trae consigo impactos ambientales tales como la perturbación en la regulación del ciclo hidrológico; bajos rendimientos en la producción agrícola y pecuaria debido a la pérdida de nutrientes, a su deterioro físico, a la pérdida de profundidad y en casos extremos a la pérdida total del suelo; degradación de la cubierta vegetal; pérdida de la biodiversidad y disminución de tierras agrícolas (Montes-León et al., 2011; Morgan 1997). De acuerdo a la FAO and ITPS (2015), el rango de erosión hídrica a nivel global se encuentra entre 20-30 Gt año⁻¹.

Son múltiples los factores que favorecen e incrementan la erosión hídrica como la intensidad de las lluvias, la resistencia del suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la presencia o ausencia de medidas de conservación. Sin embargo, debido a la variabilidad del cambio climático se han observado cambios en los

patrones de la lluvia (precipitación de corta duración, alta intensidad y periodos más largos de sequía) que potencializan los riesgos de pérdida de suelo. Debido a los cambios respecto al clima y el efecto en la pérdida de suelo y productividad, el programa de investigación de CGIAR en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS) desarrollo un conjunto de intervenciones agronómicas y planes de desarrollo con un enfoque denominado Territorios Sostenibles Adaptados al Clima (TeSAC) en lugares que se caractericen por estar en zonas de alto riesgo climático y que puedan sufrir impactos del clima cambiante. Para America Latina se seleccionaron las regiones del Cauca – Colombia y Matagalpa – Nicaragua, con el propósito de medir el impacto de las prácticas agrícolas implementadas por los pequeños agricultores que conlleve a una mayor seguridad alimentaria y que contribuyan a la disminución del impacto del cambio climático respecto a la perdida de suelo.

La región del Cauca de acuerdo a los análisis de vulnerabilidad climática del IDEAM (2015), podría presentar un aumento de la precipitación del 18 al 30% sobre los valores históricos de 1976 – 2005 y para la región de Nicaragua variaciones del 10 al 6% respecto a promedios históricos que se reflejan en sequias más prolongadas y lluvias más intensas pero de menos duración (LA PRENSA, 2015) que podrían potencializar los riesgos de pérdida de suelo por erosión hídrica; por lo tanto, el tipo de cobertura y las medidas de conservación como conjunto de intervenciones tienen un rol fundamental en la mitigación de las pérdidas de suelo, agua, nutrientes y carbono orgánico del suelo debido a que protegen el suelo del impacto directo de la lluvia reduciendo los efectos negativos de la erosión hídrica (Prosdociami et al., 2016; Panagos et al., 2015; Da Silva et al., 2011; Durán and Rodríguez, 2008). Por consiguiente el objetivo de este estudio fue evaluar el potencial de mitigación del conjunto de intervenciones agronómicas (manejos de los sistemas productivos) implementadas en los TeSAC sobre la pérdida de suelo por erosión hídrica en las zonas de estudio localizadas en el municipio de Cauca – Colombia y Matagalpa – Nicaragua, con el propósito de proporcionar a los agricultores herramientas que les permitan considerar las medidas necesarias para la prevención de la erosión en circunstancias específicas de cada región.

2. Metodología

2.1 Caracterización de las zonas de estudio

La investigación se desarrolló en los departamentos del Cauca – Colombia y Matagalpa – Nicaragua, en el municipio de Popayán – Cauca y en diferentes municipios en el departamento de Matagalpa (Fig.1). Estas regiones se caracterizan por tener clima cálido y templado con clasificación del clima Cfb para el municipio de Popayán y clima tropical con clasificación Aw para el departamento de Matagalpa de acuerdo con Köppen-Geiger (CLIMATE-DATA.ORG, 2017). Ambas regiones se caracterizan por un clima húmedo con una humedad relativa media entre 70 y 83%. La temporada de lluvias en el municipio de Popayán es de Febrero a Mayo y Septiembre a Noviembre y para el departamento de Matagalpa – Nicaragua entre los meses de Mayo a Noviembre. La precipitación media anual es de 2121 mm con un régimen bimodal y 1429 mm con régimen unimodal para el municipio de Popayán – Cauca y el departamento de Matagalpa – Nicaragua, respectivamente.

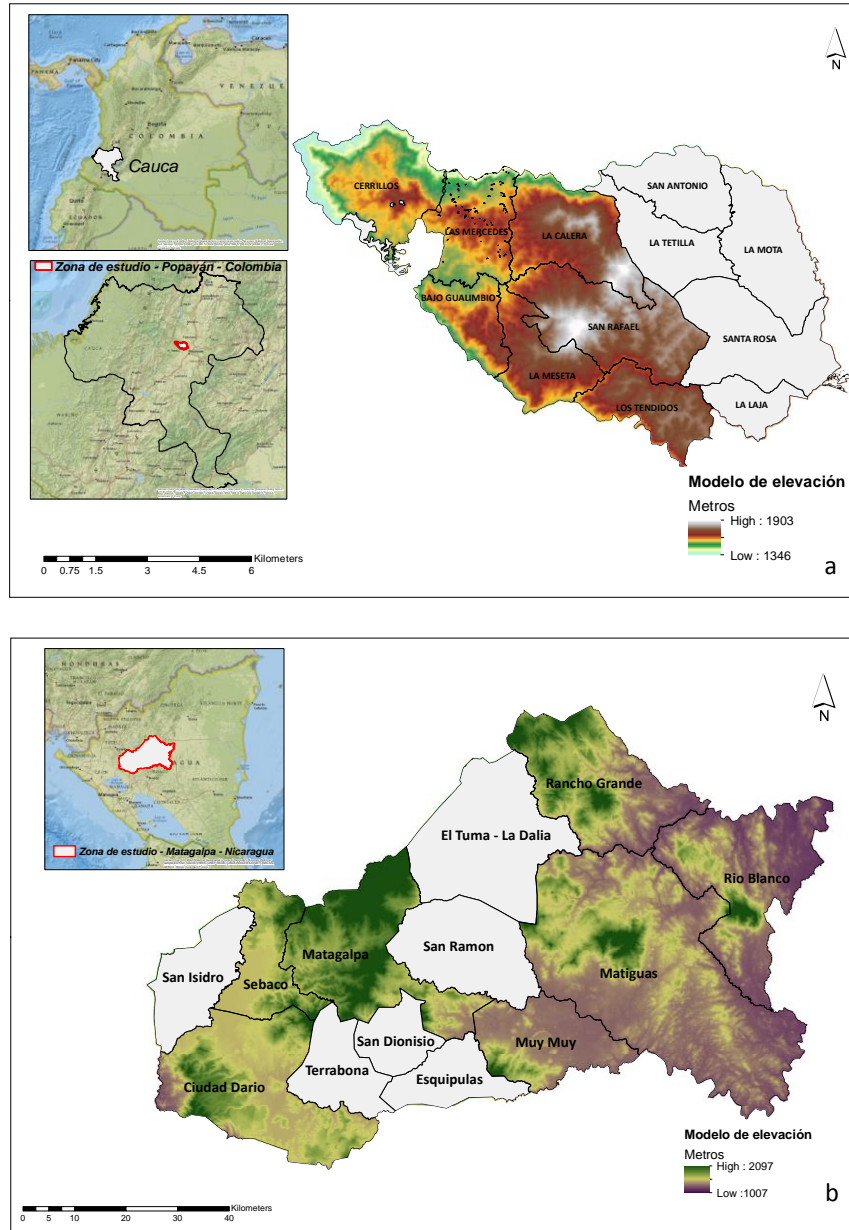


Figura 1: División Política Administrativa de las zonas de estudio delimitadas a partir de modelos digitales de elevación para a) el municipio de Popayán - Cauca - Colombia y b) el departamento de Matagalpa – Nicaragua.

2.2 Estimación de las pérdidas de suelo

Se realizó la evaluación de la erosión actual y potencial por medio de la Ecuación Universal de Pérdida de suelo (USLE) (Fig.2) desarrollada por Wischmeier y Smith (1978). La USLE es un modelo matemático empírico que estima las pérdidas de suelo actuales en $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en función de cinco (5) factores principales: Factor de erosividad de la lluvia (R), el cual expresa el potencial de la lluvia en causar erosión en $[\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{año}^{-1}]$; Factor de Erodabilidad del suelo (K) que representa la susceptibilidad del suelo en sufrir erosión en $[\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}]$; Factor topográfico (LS) el cual refleja el efecto de la topografía en las

perdidas de suelo según la longitud y grado de la pendiente; Factor de cobertura y manejo de la vegetación (C) y Factor de prácticas de conservación (P), estos tres últimos factores son adimensionales. Para determinar las pérdidas potenciales, la USLE es aplicada considerando solamente los factores R, K y LS y considerando que no hay cobertura (C) ni prácticas de conservación (P). Para efecto de comparación, las pérdidas de suelos fueron clasificadas de acuerdo a la descrita por Somarriba et al. (2005), teniendo en cuenta la relación de pérdida de suelo en centímetros y la densidad aparente para cada zona de estudio, donde pérdidas de suelo se clasificaron en baja (pérdida < 1 cm de suelo), media (pérdidas entre 1-5 cm de suelo) y alta (pérdidas mayores que 5 cm de suelo); En ese sentido y debido a las diferencias de densidad aparente específicas de cada zona de estudio la clasificación fue de 0-100,000 t ha⁻¹ año⁻¹ (baja); 100,000 – 500,000 t ha⁻¹ año⁻¹ (media) y > 500,000 t ha⁻¹ año⁻¹ (alta) para del Cauca – Colombia y 0-65 t ha⁻¹ año⁻¹ (baja); 65 – 441 t ha⁻¹ año⁻¹ (media) y > 441 t ha⁻¹ año⁻¹ (alta) para Matagalpa – Nicaragua.

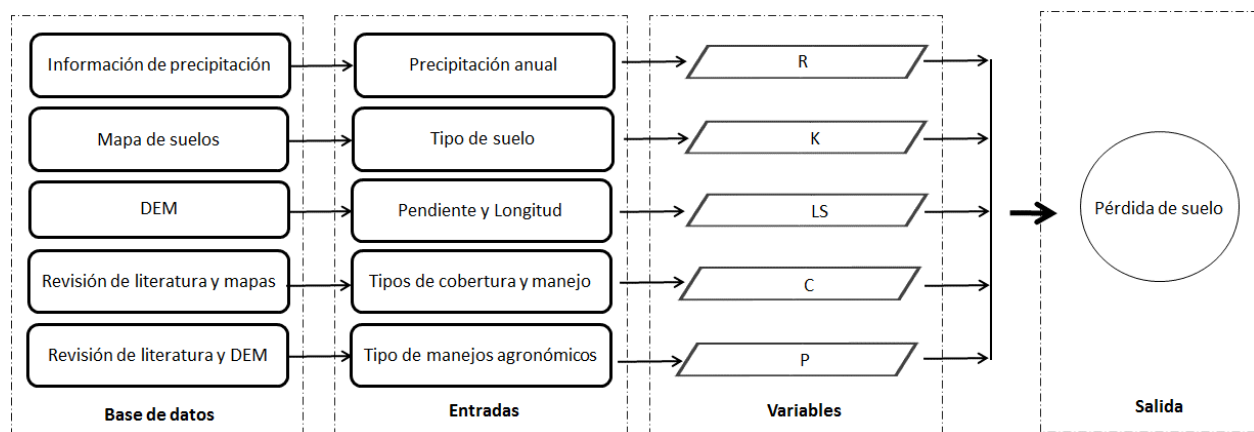


Figura 2: Diagrama de flujo del marco de la investigación.

2.2.1 Insumos del modelo

Los datos de elevación de las zonas de estudio fueron obtenidos de las fuentes libres disponibles en internet para determinación del factor topográfico (LS). Para el caso de las zonas de estudio del Cauca – Colombia y Matagalpa – Nicaragua los modelos digitales de elevación (MDE) con resolución de 30 metros fueron descargados del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) y del Centro de Investigación de Observaciones de la tierra (EORC por sus siglas en inglés), respectivamente.

En cuanto a la determinación de los factores de erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), cobertura y manejo de la vegetación (C) y prácticas de conservación (P), se extrajo la información de diferentes fuentes que se describen en la tabla 1 y a largo de la descripción de cada factor.

Tabla 1: Descripción de las fuentes y características de las variables de la ecuación de pérdida de suelo.

Variables	Bases de datos	Característica	Fuente
Factor R	Información climática – precipitación mensual y anual.	<ul style="list-style-type: none"> • Resolución espacial 0.5° del SGCM. • Bases de datos de precipitación. • Interpolación espacial a 30 años. 	<ul style="list-style-type: none"> • Global Climate Monitor (SGCM). • IDEAM e Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). • Método Statistical downscaled delta method dataset (Ramirez, 2008).
Factor K	Fracción en porcentaje de limos, arenas y arcillas y porcentaje de carbono orgánico.	<ul style="list-style-type: none"> • Mapa de suelo digitalizado del mundo (DSMW) versión 3.6 y escala 1:5'000,000. 	<ul style="list-style-type: none"> • FAO (2002) y bases de datos de suelos existentes del TeSAC.
Factor LS	Modelo digital de elevación SRTM.	<ul style="list-style-type: none"> • 30 metros resolución 	<ul style="list-style-type: none"> • Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) – Cauca - Colombia • Centro de Investigación de Observaciones de la tierra (EORC) – Matagalpa - Nicaragua
Factor C	Usos de suelo para cada una de las regiones.	<ul style="list-style-type: none"> • Shapefile vectoriales temáticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Usos del suelos del año 2014, ECOHABITAS bajo el programa (TeSAC) e Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER).
Factor P	Prácticas de conservación.	<ul style="list-style-type: none"> • Shapefile vectoriales de pendiente para Matagalpa – Nicaragua y usos de suelos para Popayán – Cauca – Colombia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Usos del suelos del año 2014, ECOHABITAS bajo el programa (TeSAC) e Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER).
Rango de Erosión hídrica	Información de densidad aparente	<ul style="list-style-type: none"> • Raster densidad aparente para la zona de Nicaragua con resolución de 250 metros e información de los TeSAC para la zona de Cauca 	<ul style="list-style-type: none"> • ISRIC (2017) - Nicaragua • Información de, ECOHABITAS bajo el programa (TeSAC).

2.2.2 Factor de erosividad de la lluvia (R)

Este factor cuantifica el impacto de la lluvia y refleja la tasa de escorrentía asociada a los eventos de precipitación (Zhu, 2015). Para determinar el factor R, se utilizó el índice de Fournier modificado (Tabla 2), usando la información de precipitación mensual y anual siguiendo el enfoque de Arnoldus (1980) en dos condiciones de clima: a) escenario actual a un rango entre 1990-2016 y b) escenario de cambio climático a 30 años entre 2021-2049. Debido a la escasa información de clima de las zonas de estudio para determinar el factor R para la condición (a) en la zona de estudio en el municipio de Popayán - Cauca – Colombia la precipitación se obtuvo a partir de la base de datos climáticos a escala global del sistema Global Climate Monitor (SGCM) a una resolución espacial de 0.5° y de las bases de las estaciones Saté y Aeropuerto Guillermo León Valencia del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y para el departamento de Matagalpa – Nicaragua se emplearon las estaciones Muy Muy, La Dalia y Raul Gonzalez del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). Para el desarrollo de los escenarios a 30 años del factor R, para la información de precipitación se empleó el método Statistical downscaled delta method dataset (Ramirez, 2008) basado en la interpolación espacial, para las predicciones de los patrones de precipitación. El mapa de erosividad para cada región de estudio en las condiciones entre 1990-2016 y el escenario a 30 años fue desarrollado a una resolución de 30 m utilizando el método de interpolación Kriging Ordinary (Matheron, 1971).

2.2.3 Factor de Erodabilidad del suelo (K)

Es una medida de la susceptibilidad inherente de las partículas del suelo a la erosión, este factor indica la vulnerabilidad del suelo al desprendimiento y al transporte de suelo por medio de las gotas de lluvia y la escorrentía, se define como la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosión de lluvia medida en una parcela estándar siendo menos susceptible el suelo con menor valor de K (Wischmeier y Smith, 1978; Flanagan y Nearing, 1995). Por no disponer de datos de la parcela estándar para cada zona de estudio, se utilizó una función matemática que relaciona el porcentaje de arena, limo, arcilla y contenido de materia orgánica según Neitsch et al. (2005) y Williams (1995) (Tabla 2). El mapa del factor K fue generado a partir de reclasificación del mapa de suelo digital del mundo con las siglas en inglés (DSMW) versión 3.6 de la FAO (2002) y escala 1:5'000,000, de acuerdo a los contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica de la base de datos existente del TeSAC para cada una de las zonas de estudio.

2.2.4 Factor topográfico (LS)

Este factor se encuentra relacionado con la longitud y gradiente de la pendiente. La relación entre la erosión y el factor LS es directamente proporcional, es decir, la erosión aumenta conforme la longitud del terreno en el sentido de la pendiente (factor L) y la inclinación del terreno se hace mayor (factor S). A partir del MDE de 30 metros de resolución se generó el raster de la pendiente del terreno y la longitud de la pendiente fue determinada a partir de la ecuación sugerida por Desmet y Govers (1996) y McCool et al. (1987,1989) en función de las características de las zonas de estudio (Tabla 2) para finalmente determinar los valores LS.

2.2.5 Factor de cobertura y manejo de la vegetación (C)

Representa la capacidad de la vegetación de impedir el arrastre de sedimento (Mendoza, 2013). Este valor depende del tipo de vegetación, la etapa de crecimiento y el porcentaje de cobertura (Chatterjee, 2014). El factor C tiene valores que varían de 0-1, siendo que valores altos indican que no hay efecto de cobertura y la pérdida de suelo es comparable con la de un suelo degradado, mientras que el valor más bajo significa un efecto de cobertura adecuado que permite reducir los efectos de la erosión (Ereñcin, 2000). El factor C indica como los planes de conservación afectarán la pérdida promedio anual y cómo la pérdida potencial de suelo será distribuida en el tiempo durante las actividades de construcción, rotaciones de cultivo y otros esquemas de manejo. Este factor se determinó a partir de fuentes bibliográficas (Anexo 1, 2); considerando el tipo de cultivo e intervenciones agronómicas sin (antes del TeSAC) y con implementación (después del TeSAC) de las prácticas de conservación del programa Territorios Sostenibles Adaptados al Clima TeSAC (Figura 3); los datos de cultivo y tipo de manejo agronómico fueron colectados a partir de la información de usos del suelos del año 2014 suministrada por ECOHABITAS bajo el programa TeSAC para el caso de municipio de Popayán - Cauca – Colombia, para el departamento de Matagalpa - Nicaragua se usó información suministrada por Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) para coberturas del año 2014.

	Reforestación	Prácticas de conservación	Uso de enmiendas orgánicas	Manejo de residuos de cosecha
Antes del TeSAC	Rastrojo, suelo desnudo en las riberas de los ríos	Quemas para la preparación de los cultivos	Fertilización química	Removido, no se utiliza, se exporta fuera de la finca
Después del TeSAC	Plantación de Nogales, Matarraton, cerca vivas	Sin quemas	Enmiendas orgánicas para el café, Caña de azúcar y huertas	Removido, se realiza compost usando la aireación

Figura 3: Prácticas agrícolas antes y después de implementadas las estrategias de adaptación en la veredas los Cerrillos y el Danubio, Cauca - Colombia y extrapoladas para el desarrollo de los escenarios.

2.2.6 Factor de prácticas de conservación (P)

Es la relación de pérdida de suelo de acuerdo a las prácticas mecánicas de conservación aplicadas (contornos, terrazas, cultivos en fajas) para el control de la erosión que reducen la cantidad y la velocidad del agua de escorrentía (Kuok et al., 2013); el rango de este factor se encuentra entre cero (0) y uno punto tres (1.3), en el cual el valor más alto es asignado áreas que no presentan prácticas de conservación (infraestructuras y viviendas) y los valores más bajos a áreas de plantaciones con franjas y cultivos de

contorno (Yuan et al., 2016). Este factor se determinó con la información de pendiente obtenida del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) para el departamento de Matagalpa – Nicaragua, empleando el rango de clasificación de Suryawanshi et al., (2017), donde se establece las tasas de pérdida de suelo causadas por la relación de las prácticas y el grado de la pendiente. Para el municipio de Popayán-Cauca - Colombia se utilizó la cobertura de suelo para identificar las prácticas de manejo de acuerdo a referencias bibliográficas (Anexo 3).

Tabla 2: Ecuaciones utilizadas para determinar las pérdidas de suelo y los factores relacionados.

Factores	Modelo de ecuación	Métodos
Perdidas de suelo (USLE) ¹	$A=R*K*LS*C*P$	Wischmeier and Smith (1978)
Factor R ²	$FMI=\sum_{i=1}^{12}(P_i^2/P_t)$	Arnoldus (1977)
	* Zona de Cauca: $R = (40.41 * (\sum_{i=1}^{12}(P_i^2/P_t)))+291.4$	*Sonder (2002)
	** Zona Nicaragua $R = (4.17 * (\sum_{i=1}^{12}(P_i^2/P_t)) - 152$	**Arnoldus (1998)
Factor K ³	$K = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand}$	Neitsch et al. (2000) y Williams (1995)
Factor L ⁴	$L = \frac{(A_{(i,j)}+D^2) - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^{m*D^{m+2}} + 22.13^m}$	Desmet & Govers (1996)
	$m = \frac{F}{(F+1)}$	Desmet & Govers (1996)
	$F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8+0.56}}$	McCool et al. (1989)
Factor S ⁵ .	$S = 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 \quad S < 9\%$	McCool et al. (1987,1989)
	$S = 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.50 \quad S \geq 9\%$	

1. A: Pérdida de suelo por erosión hídrica ($t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) Factor de erosividad de la lluvia (R) expresado en [$\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1} \text{ año}^{-1}$]; Factor de Erodabilidad del suelo (K) expresado [$t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$]; Factor topográfico (LS) en función de la longitud y la pendiente; Factor de cobertura y manejo de la vegetación (C) y Factor de prácticas de conservación (P).

2. Factor R; FMI= índice de Fournier modificado; R = FMI (siguiendo el enfoque de Arnoldus (1978)); P_i: promedio de precipitación mensual; P_t: promedio de precipitación anual.

3. Factor K; F_{csand}: es un factor que reduce el indicador K; F_{cl-si}: factor que proporciona factores bajos de erosión con proporciones alta de arcilla y limo; F_{orgc}: reduce valores de K en suelo con altos contenidos de carbono; F_{hisand}: disminuye los valores de K para suelo con altos contenidos de arenas.

4. Factor L: factor de la longitud de la pendiente (metros); A: Flujo acumulado; D: tamaño del pixel y X es el factor de corrección de forma; m: es el exponente de la longitud de la pendiente donde β se relaciona con la erosión causada por los flujos y la erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia; F: es el valor del radio F, respecto a la erosión por efecto de los flujos y el impacto de la precipitación; β es el ángulo de la pendiente.

5. Factor S: factor de gradiente de la pendiente, donde β es el ángulo de la pendiente

3. Resultados y discusiones

3.1 Factor de erosión de lluvia (R)

El factor fue determinado considerando la situación actual (años 1990 al 2016) para ambas zonas de estudio (Figuras 4a, 4c) y modelados a 30 años (años 2021 al 2049) (Figuras 4b, 4d). El límite inferior del rango del factor de lluvia fue de 5693 y 565 $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm hr}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y el límite superior de 19739 y 1430 $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm hr}^{-1} \text{ año}^{-1}$, para las zonas de estudios localizadas en el municipio de Popayán – Cauca – Colombia y en el departamento de Matagalpa – Nicaragua, respectivamente; donde se observó que para la zona de estudio localizada en el municipio de Popayán – Colombia, el factor de erosión de acuerdo a la información de precipitación de los últimos 26 años presenta mayores valores hacia la zona alta entre las veredas Cerrillos y Las Mercedes (figura 4a), misma tendencia que se observa en la figura 4b, en las condiciones de precipitación proyectados a 30 años. Para la zona de estudio ubicada en el departamento de Matagalpa – Nicaragua con las condiciones actuales de precipitación a lo largo del período de evaluación presentan dos condiciones marcadas de alta y bajos valores del factor (figura 4c) donde la zona de mayor valor se encuentra ubicada entre los municipios de Muy muy y Matiguas y menor valor entre los municipios de San Dionisio, Terrabona y Esquipula, donde al proyectar las condiciones de precipitación a 30 años, se observa un cambio en la distribución de la erosividad con mayores valores ocurriendo al largo de la zona estudio en dirección al oeste (figura 4d).

En general, se observa que los valores de R para Cauca y Nicaragua están dentro del rango (700 a 30.000 $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1} \text{ año}^{-1}$) reportado en otros estudios para las condiciones del trópico (Sonder, 2002), pero son bastante distintos entre las dos regiones siendo que Cauca presenta valores muy más elevados que Nicaragua. El cambio en el patrón de distribución del factor R observado para Nicaragua cuando proyectamos las condiciones de precipitación a 30 años refuerza los efectos más pronunciados del cambio climático para esa región y alerta para la necesidad de implementar prácticas de adaptación al cambio climático que contribuyen a evitar la degradación de los suelos por erosión hídrica. Para Cauca se observa menor efecto del cambio climático en 30 años sobre la erosión hídrica, pero indica que puede haber un mayor efecto de la variabilidad climática entre los meses y años lo que requeriría información más detallada de precipitación para determinar el factor R mensual e interanual y así definir los momentos críticos durante el año donde las prácticas de conservación del suelo deben estar implementadas para no haber degradación.

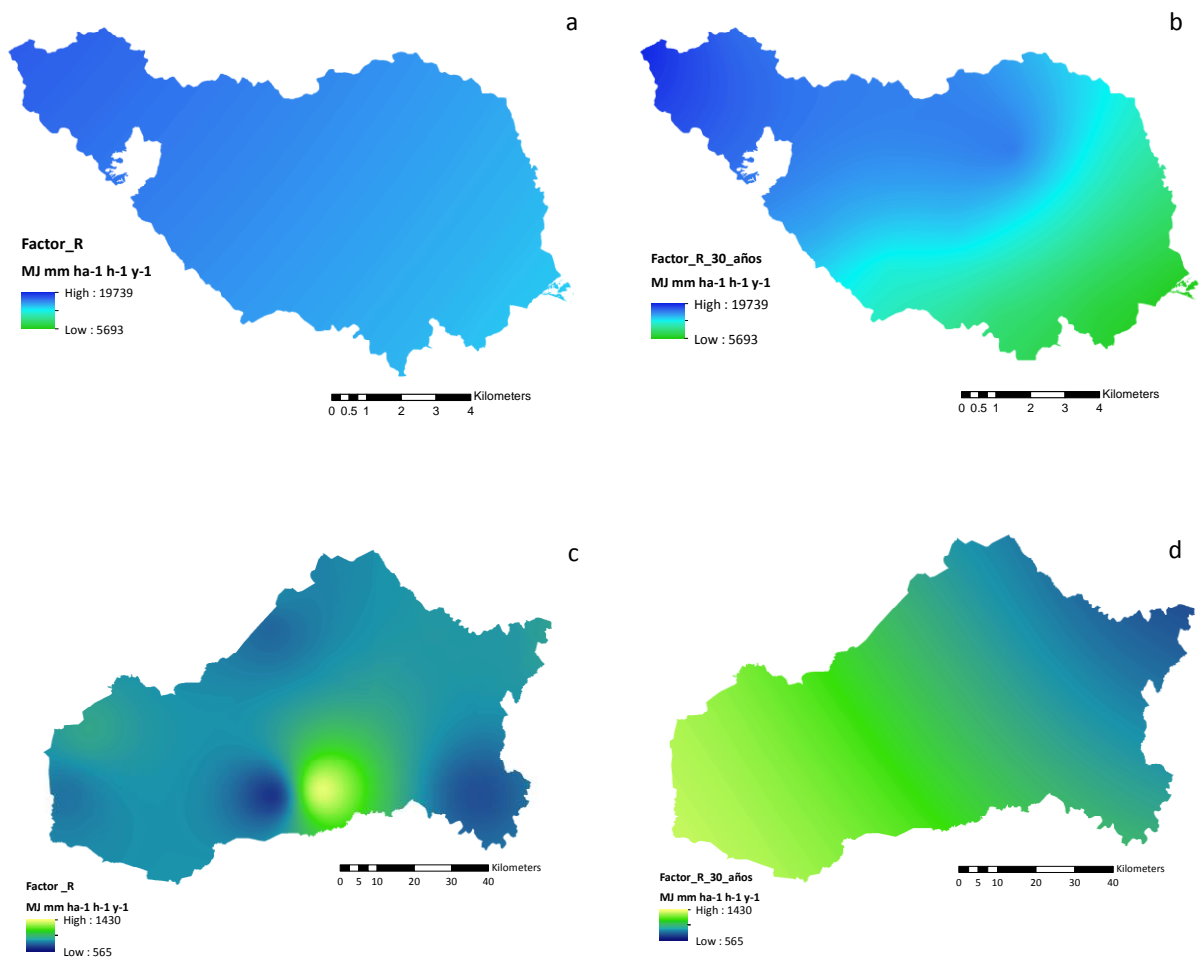


Figura 4. Mapas del factor de erosión de lluvia (R) para las zonas de estudio delimitadas en el municipio de Popayán - Cauca – Colombia (a y b) y para el departamento de Matagalpa – Nicaragua (c y d) donde a-c) 26 años de información de precipitación; b-d) escenarios modelados a 30 año.

3.2 Factor de Erodabilidad de suelo (K)

El mapa de Erodabilidad del suelo (K) de las zonas de estudio fue generado a partir del mapa de suelo del mundo digitalizado de la FAO (2002), donde se encontraron dos tipos de suelo para la zona de estudio delimitada para el municipio de Popayán – Cauca - Colombia: Andosoles mólicos y Litosoles y para el departamento de Matagalpa – Nicaragua se encontraron 14 tipos de suelos: Acrisoles Plinticos, Acrisoles húmicos, Gleysols mólicos, Histosoles Dystric, Acrisoles orticos, Kuvisols férricos, Cambisoles Dístricos, Nitosoles Dystricos, Planosoles, Cambisoles éutricos, Regosoles distróficos, Gleysols plinticos, Cambisoles verticos y Luvisoles crómicos. El mapa de la distribución espacial del factor K se presenta en la figura 5, donde el rango inferior se encuentra entre 0.013 y 0.014 t h MJ⁻¹ mm⁻¹ y el superior en 0.022 t h MJ⁻¹ mm⁻¹ para las zonas estudio localizadas en el municipio de Popayán – Cauca y el departamento de Matagalpa – Nicaragua, respectivamente. De acuerdo a los resultados reportado por Sonder (2002), para las regiones de Quilichao y Mondomo – Cauca – Colombia que consideran los períodos de lluvia y sequía y algunos

países del tropico, el factor K de 0.03 a 0.026 t h MJ⁻¹ mm⁻¹, se encuentra cercanos a los valores encontrados para suelos similares para ambas zonas de estudio.

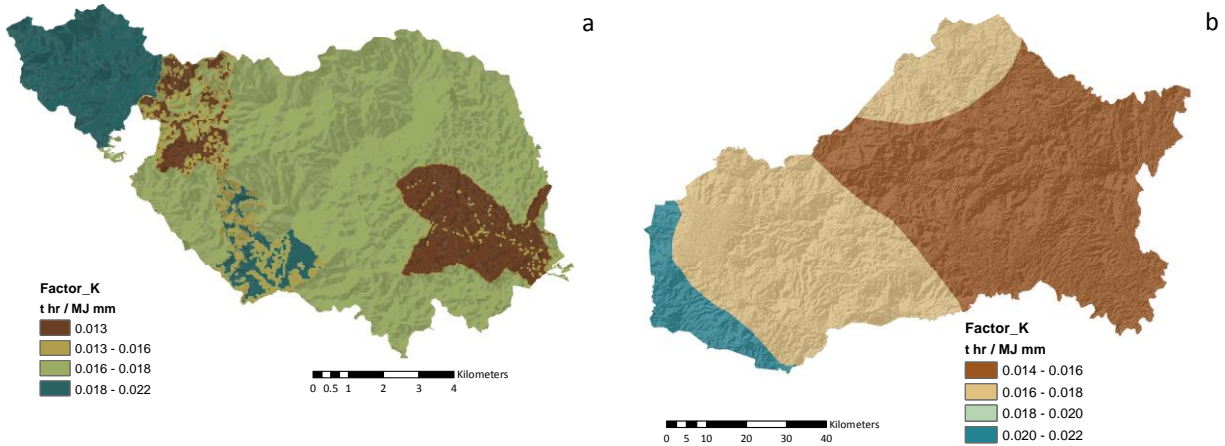


Figura 5. Factor de Erodabilidad del suelo para las zonas de estudio delimitadas en el: a) municipio de Popayán - Cauca – Colombia; b) departamento de Matagalpa – Nicaragua.

3.3 Factor topográfico (LS)

Las áreas de estudio presentan una altitud de 1738 y 680 msnm para el municipio de Popayán – Colombia y el departamento de Matagalpa – Nicaragua, respectivamente. Los valores de pendiente. Los resultados de la figura 6, muestran que los valores del factor LS para ambas zonas de estudio varían entre 0 y 2410, con la mayoría de los valores cercano al valor extremo, lo que significa que la pendiente es muy pronunciada (> 80%) y las longitudes son muy largas siendo altamente susceptibles a la pérdida de suelo por erosión hídrica, debido a la energía potencial para transportar las partículas del suelo aguas abajo con mayor velocidad.

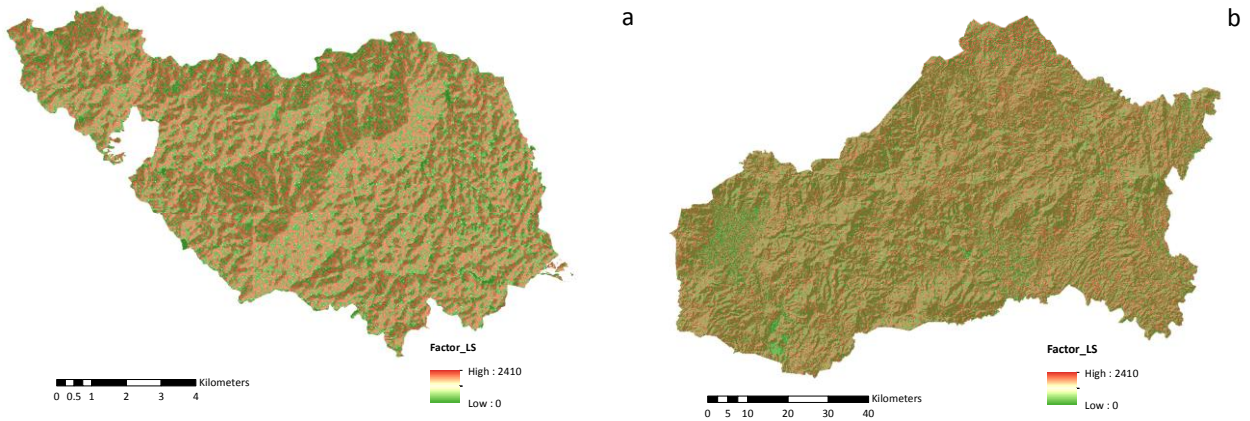


Figura 6. Factor topográfico para las zonas de estudio delimitadas en el: a) municipio de Popayán - Cauca – Colombia; b) departamento de Matagalpa – Nicaragua.

3.4 Factor de cobertura y manejo (C)

Los resultados de la figura 7, ilustran los valores del factor C con las condiciones de coberturas del año 2014 y la implementación de prácticas climáticamente inteligentes adaptadas al clima como escenario de conservación. El factor C tiene un rango de valores entre 0 y 1 siendo que 0 indica mejor protección del suelo y 1 suelo sin protección (suelo desnudo). Se identificaron que para ambas zonas de estudio los escenarios del factor C presentan más áreas con valores cercanos al valor cero (0), lo que indica un efecto positivo de las prácticas climáticamente inteligentes de las diferentes zona de estudio sobre la disminución de la erosión hídrica.

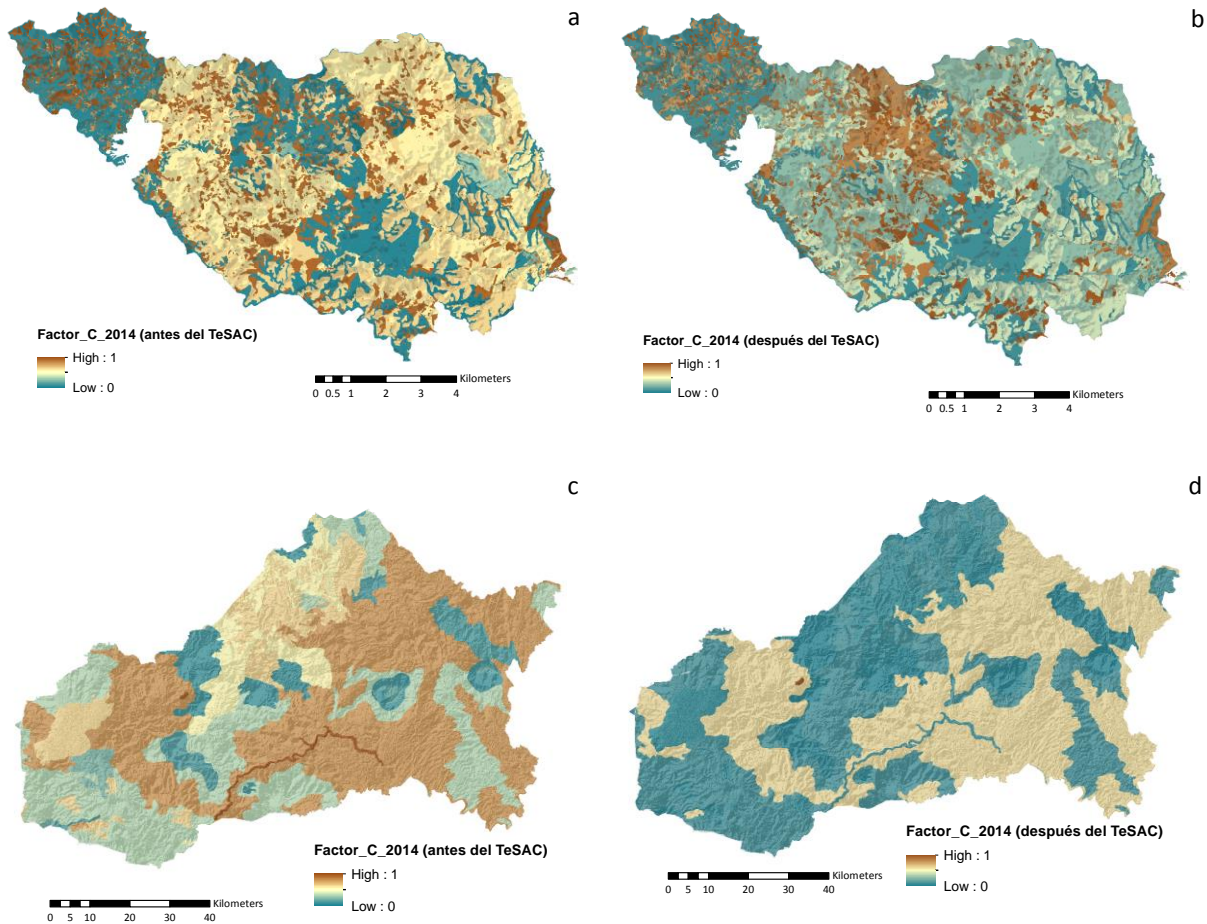


Figura 7. Factor de cobertura y manejo de la vegetación para las zonas de estudio delimitadas: a) Factor C con coberturas del año 2014 sin implementación de prácticas adaptadas al clima para la zona de estudio en el municipio de Popayán - Cauca – Colombia (antes del TeSAC); b) Escenario del factor C con coberturas del año 2014 con prácticas de conservación adaptadas al clima para la zona de estudio en el municipio de Popayán - Cauca – Colombia (después del TeSAC); c) Factor C con coberturas del año 2014 sin implementación de prácticas adaptadas al clima para la zona de estudio en el departamento de Matagalpa – Nicaragua (antes del TeSAC); d) Escenario del factor C con coberturas del año 2014 con prácticas de conservación adaptadas al clima para la zona de estudio en el departamento de Matagalpa – Nicaragua (después del TeSAC).

3.5 Factor de prácticas de conservación (P)

En la figura 8a, se presentan el mapa de distribución del rango de valores del factor (P). El factor P para la zona de estudio delimitada en el municipio de Popayán – Cauca se encuentra entre 0 y 1.3, donde los valores cercanos a cero se asocian a prácticas de conservación de terrazas implementadas y que consiste en la división de la pendiente el cual disminuye el impacto de la lluvia. Esta práctica se logró identificar de acuerdo a la información suministrada por el estudio sobre las comunidades: informe de análisis del sitio para CAUCA – CERRILLOS, Colombia; de acuerdo a Wall et al. (2002) este rango y prácticas implementadas permiten la reducción de la erosión en un 10 al 90%, debido a la intercepción de la escorrentía y a la

disminución de la velocidades erosivas por efecto de la lluvia. Para la zona de estudio delimitada en el departamento de Matagalpa – Nicaragua, el rango del factor (P) (figura 8b), se presentó entre 0.55 y 0.91 de acuerdo a la clasificación de las condiciones topográficas de la zona delimitada, para este rango de acuerdo a Wall et al. (2002) la prácticas de contorno de cultivos que consiste en la siembra siguiendo los contornos topográficos que permite que el agua fluya uniformemente reduce la erosión en 10 al 75%.

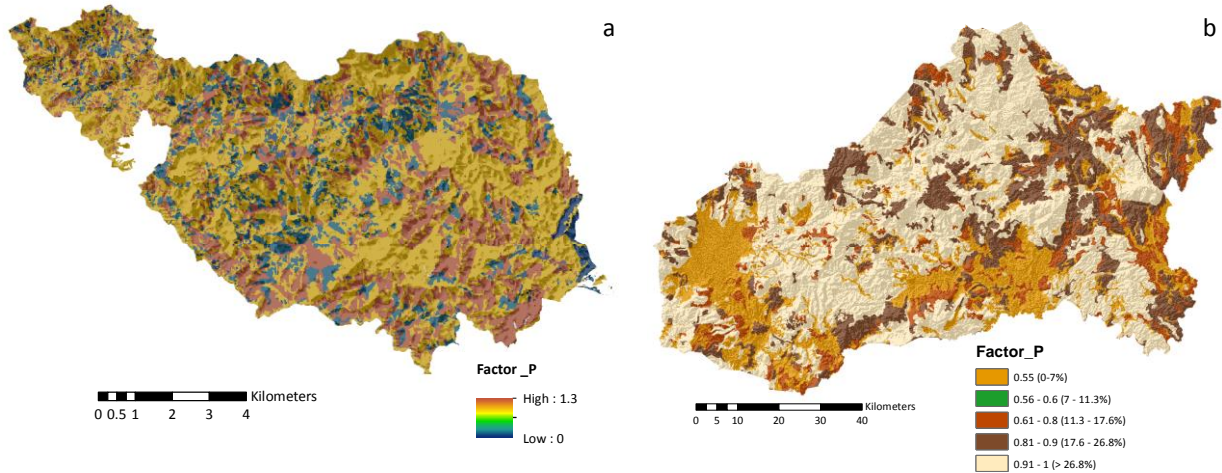


Figura 8. Factor de prácticas de conservación (P) para las zonas delimitadas en el: a) municipio de Popayán - Cauca – Colombia; b) departamento de Matagalpa – Nicaragua.

3.6 Pérdida de suelos

3.6.1 Zona de estudio delimitada en el municipio de Popayán – Colombia.

En las figuras 9 y 10 son presentados, respectivamente, los mapas de pérdida de suelo y porcentaje de pérdida de suelo para la zona delimitada en el municipio de Popayán - Cauca – Colombia bajo diferentes escenarios del factor de erosión de lluvia (R) y cobertura y manejo de la vegetación (C). Entre los escenarios evaluados el escenario 5 y 6 presentan las mayores pérdidas de suelo ($\sim 831,048 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) mientras el escenario después de implementadas las prácticas climáticamente inteligentes (después del TeSAC) presenta los valores más bajos ($\sim 68,696 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Según la erosión potencial para la zona (fig. 9e y 10 Esc. 5), se observa que la ausencia de cobertura y prácticas de conservación generan pérdidas de suelo medias y altas en 18% del área total de la zona. Sin embargo, el mantenimiento de la cobertura del suelo como presentado en la situación actual (fig. 9a y 10 Esc.1) reduce las áreas con pérdidas medias y altas para 2.2% (reducción de 15.8% en relación al potencial). La reducción de las perdidas medias y altas (> 5 cm de suelo perdido) es aún mayor y más efectiva cuando las estrategias de adaptación son implementadas en los TeSAC (fig. 9b y 10 Esc. 2) generando una reducción de hasta 17.8% de las áreas con pérdidas medias y altas en relación a las pérdidas potenciales y, consecuentemente, aumentando las áreas con pérdidas bajas para 99.8% del area total.

Evaluando los efectos del cambio climático en la precipitación y por lo tanto reflejado en las pérdidas de suelo (fig. 9c-d y 10 Esc. 3-4), se observa poco (Esc.3) o ninguno (Esc.4) efecto del cambio climático en las pérdidas de suelo por erosión hídrica demostrando que no hay un efecto directo del cambio climático a 30 años sobre las pérdidas de suelo como ya había sido observado en el análisis del factor R arriba.

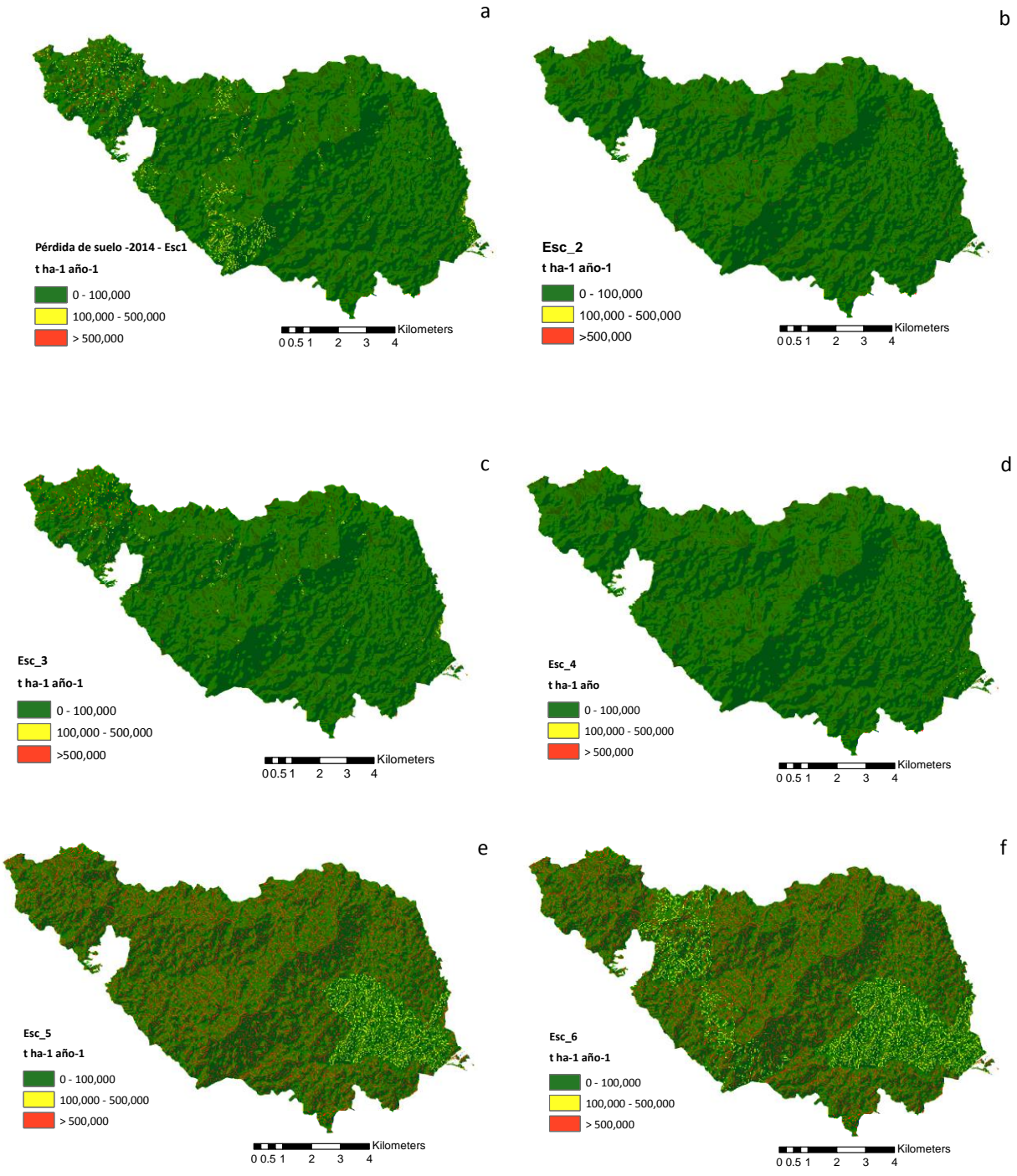
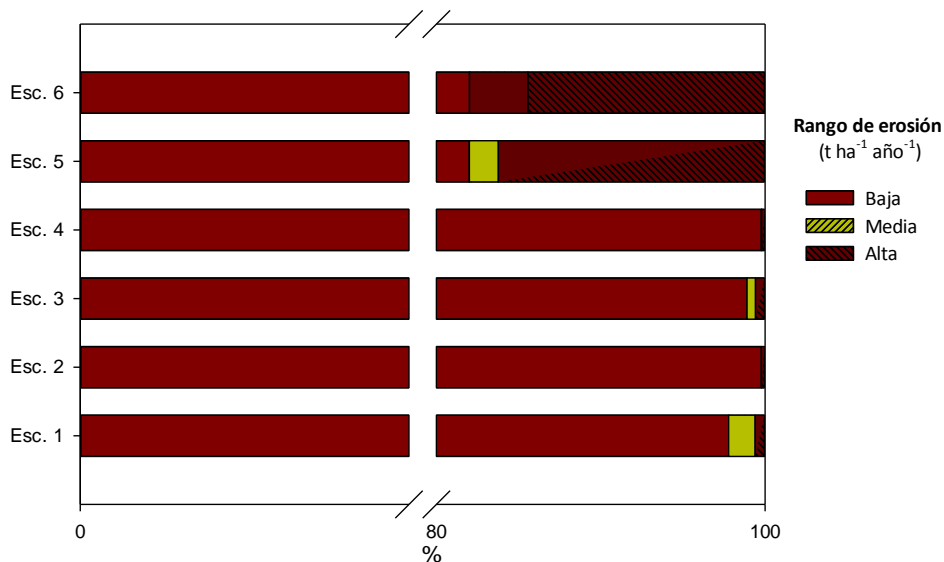


Figura 9. Mapas de pérdida de suelo para la zona delimitada en el municipio de Popayán - Cauca – Colombia bajo diferentes escenarios del factor de erosión de lluvia (R) y cobertura y manejo de la vegetación (C); a) Sin Implementación del TeSAC -2014 (Esc.1); b) valores del factor (C) con mayor cobertura (Esc.2) – implementación del TeSAC ; c) Valores del factor R extrapolados a 30 años (Esc.3) considerando los factores K,LS,P,C condiciones sin TeSAC; d) Valores de mayor cobertura en el factor (C) con relación al factor R extrapolado a 30años (Esc.4); e) Erosión potencial considerando los factores R,K,LS (Esc.5); f) Erosión potencial considerando los factores de R a 30 años, K,LS(Esc.6).



Rango de erosión (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Esc.1 (%)	Esc.2 (%)	Esc.3 (%)	Esc.4 (%)	Esc.5 (%)	Esc.6 (%)
0 – 100,000	97.8	99.8	98.9	99.8	82.0	82.0
100,000-500,000	1.6	0.0	0.5	0.0	1.8	3.6
>500,000	0.6	0.2	0.6	0.2	16.2	14.4

Figura 10. Porcentaje pérdida de suelo para la zona delimitada en el municipio de Popayán - Cauca – Colombia bajo diferentes escenarios del factor de erosión de lluvia (R) y cobertura y manejo de la vegetación (C); a) Sin Implementación del TeSAC -2014 (Esc.1); b) valores del factor (C) con mayor cobertura (Esc.2) – implementación del TeSAC ; c) Valores del factor R extrapolados a 30 años (Esc.3) considerando los factores K,LS,P,C condiciones sin TeSAC; d) Valores de mayor cobertura en el factor (C) con relación al factor R extrapolado a 30años (Esc.4); e) Erosión potencial considerando los factores R,K,LS (Esc.5); f) Erosión potencial considerando los factores de R a 30 años, K,LS(Esc.6).

3.6.2 Zona de estudio delimitada en el departamento de Matagalpa – Nicaragua.

En las figuras 11 y 12 son presentados, respectivamente, los mapas de pérdida de suelo y porcentaje de pérdida de suelo para la zona delimitada en el departamento de Matagalpa – Nicaragua bajo diferentes escenarios del factor de erosión de lluvia (R) y cobertura y manejo de la vegetación (C). Entre los escenarios evaluados el escenario 5 presenta las mayores pérdidas de suelo (~22,958 t ha⁻¹año⁻¹) mientras

el escenario después de implementadas las practicas climáticamente inteligentes (después del TeSAC) presenta los valores promedios más bajos ($\sim 65 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$).

Según la erosión potencial para la zona (fig. 11e y fig. 12 Esc. 5), se observa que la ausencia de cobertura y prácticas de conservación generan pérdidas de suelo medias y altas en más de 65% del área total de la zona. Similar a la zona de estudio en Colombia, solamente el mantenimiento de la cobertura del suelo, como presentado en la situación actual (fig. 11a y fig.12 Esc.1), ya tiene potencial para reducir las pérdidas de suelo lo que demuestra que la cobertura juega un rol importante en el impacto que la lluvia tiene sobre la pérdida de suelo. Sin embargo, comparado a Colombia, en Nicaragua se observa una mayor reducción de las áreas de pérdidas medias y altas, el cual pasan de 67.5% para 15.5% (reducción de 52% en relación al potencial). Además del efecto de la cobertura se observa que las estrategias de adaptación implementadas en los TeSAC (fig. 11b y fig. 12 Esc. 2) redujeron las áreas con pérdidas altas en casi la mitad cuando comparado con el escenario actual (redujo de 14.3 a 7.7%) y aumentando las áreas con erosión media y baja.

En general, evaluando los efectos del cambio climático sobre las pérdidas de suelo (fig. 11c-d-f y fig.12 Esc. 3-4-6), percibes que hay efecto del cambio climático en las pérdidas de suelo por erosión hídrica como observado en el patrón de la distribución espacial de la erosividad de la lluvia para esta región. Para todos los escenarios de cambio climático evaluados, hubo un aumento en las áreas con altas pérdidas de suelo y reducción de las áreas con pérdidas bajas cuando comparadas con los escenarios de clima actual.

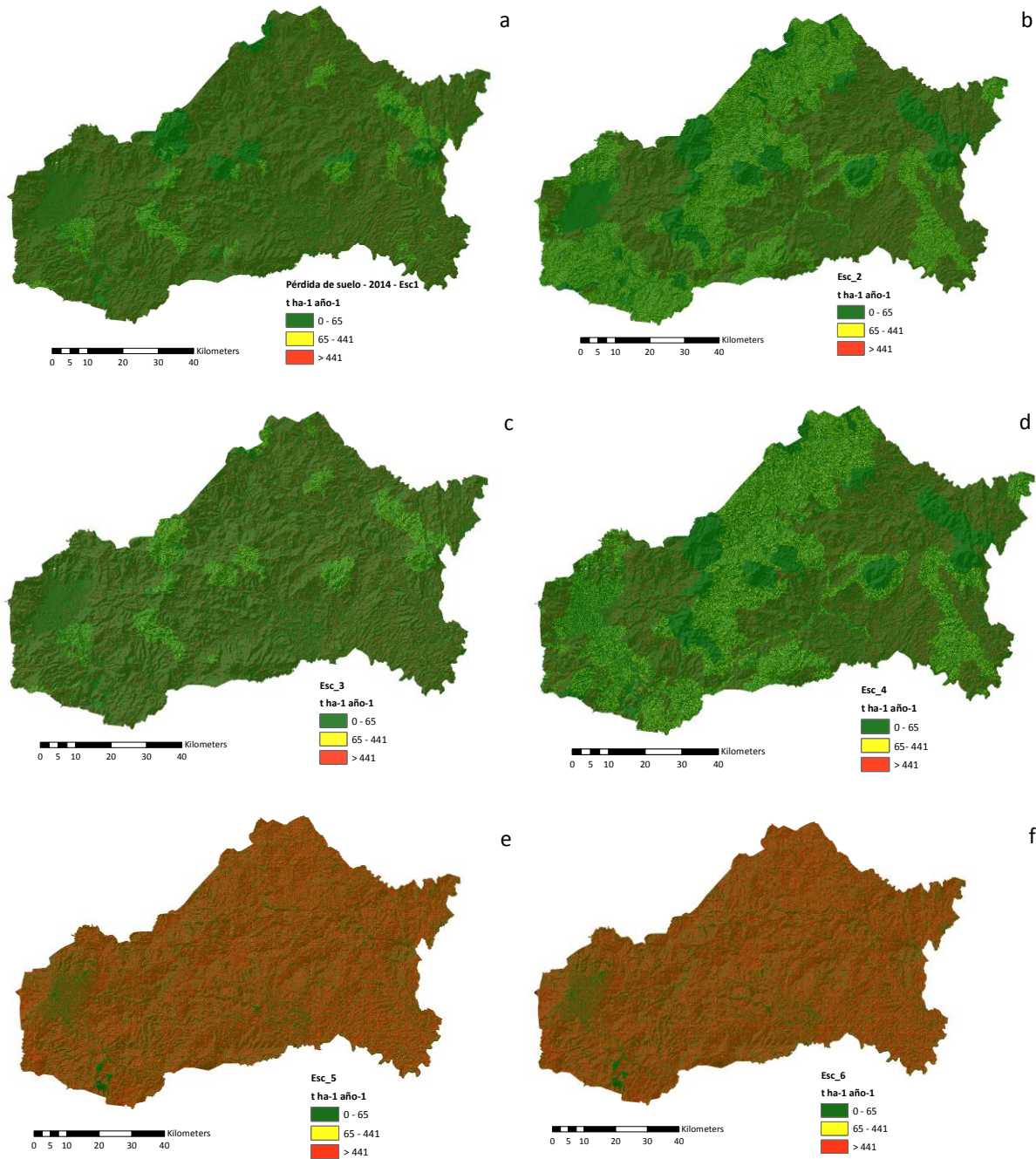
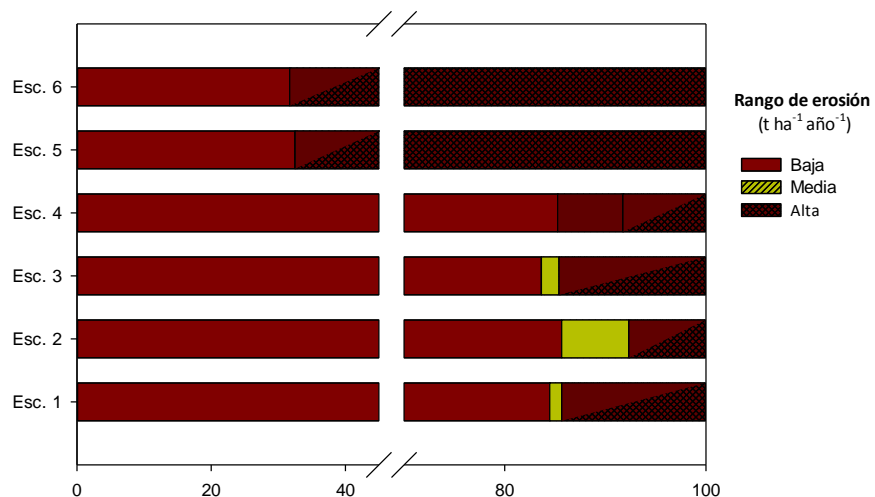


Figura 11. Mapas de pérdida de suelo para zona de estudio delimitada en el departamento de Matagalpa - Nicaragua bajo diferentes escenarios del factor de erosión de lluvia (R) y cobertura y manejo de la vegetación (C); a) Sin Implementación del TeSAC -2014 (Esc.1); b) Escenario del factor de cobertura y manejo de la vegetación con implementación del TeSAC-2014 (Esc.2); c) Escenario del factor (C) sin Implementación del TeSAC -2014 y factor (R) extrapolado a 30 años (Esc.3); d) Escenario del factor (C) con Implementación del TeSAC -2014 y Factor R extrapolado a 30 años (Esc.4); e) Erosión potencial considerando los factores R,K,LS (Esc.5); f) Erosión potencial considerando los factores de R extrapolado a 30 años, K,LS (Esc.6).



Rango de erosión (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Esc.1 (%)	Esc.2 (%)	Esc.3 (%)	Esc.4 (%)	Esc.5 (%)	Esc.6 (%)
0 - 65	84.5	85.7	83.7	85.3	32.5	31.7
65 - 441	1.2	6.7	1.8	6.5	0.0	0.0
> 441	14.3	7.7	14.6	8.2	67.5	68.3

Figura 12. Porcentaje de pérdida de suelo para zona de estudio delimitada en el departamento de Matagalpa - Nicaragua bajo diferentes escenarios del factor de erosión de lluvia (R) y cobertura y manejo de la vegetación (C); a) Sin Implementación del TeSAC -2014 (Esc.1); b) Escenario del factor de cobertura y manejo de la vegetación con implementación del TeSAC-2014 (Esc.2); c) Escenario del factor (C) sin Implementación del TeSAC -2014 y factor (R) extrapolado a 30 años (Esc.3); d) Escenario del factor (C) con Implementación del TeSAC -2014 y Factor R extrapolado a 30 años (Esc.4); e) Erosión potencial considerando los factores R,K,LS (Esc.5); f) Erosión potencial considerando los factores de R extrapolado a 30 años, K,LS (Esc.6).

Los resultados de este estudio contribuyen a diagnosticar el estado del recurso suelo de acuerdo a la topografía, coberturas de suelo y prácticas de conservación de las zonas de estudio evaluadas en el municipio de Popayán – Cauca y el departamento de Matagalpa – Nicaragua, con el propósito de promover la importancia de la implementación de prácticas de conservación y políticas de uso de la tierra, motivadas por la amenaza de degradación del recurso suelo.

En consecuencia, el uso continuo de suelos sin considerar sus límites, así como las prácticas inadecuadas de conservación y gestión, pueden hacer las localidades que comprende las zonas de estudio expanda sus sistemas productivos hacia áreas de interés social, poniendo en peligro las políticas de preservación de la biodiversidad y el suministro de agua. En términos metodológicos, con respecto a las generalizaciones inherentes a la adaptación local-regional, este estudio debe entenderse como una iniciativa para introducir la ciencia del suelo en una agenda de discusiones regionales.

Conclusiones

A pesar de las sobreestimaciones que pudo generar el modelo debido a las diversas formas de calcularse los factores y bases de datos disponibles, se tiene una estimación de las tendencias, donde las áreas evaluadas son altamente susceptibles a la degradación por sus condiciones naturales. Estos resultados pueden ser una guía acerca de qué tipo de prácticas de manejo, investigaciones e información son necesarios a largo plazo para la conservación del recurso suelo.

Para la pérdida de suelo por erosión hídrica el factor de cobertura y la adopción de estrategias de adaptación implementadas en los TeSAC tiene un efecto relevante para la conservación del recurso suelo, lo que conlleva que las estrategias de mitigación sean una herramienta para la conservación y seguridad alimentaria determinando las potencialidades de la región en términos de adaptación al cambio climático.

En la zona de estudio delimitada en el municipio de Popayán – Cauca, el factor de erosión de lluvia que considera cambio climático no tuvo un efecto significativo en las modelaciones actuales y potenciales de pérdida de suelo por erosión hídrica, debido a que en esta zona el efecto de clima tiene mayor incidencia en la intensidad de la lluvia mensual e interanual, esto se debe a la conformación orográfica que tienen influencia sobre el comportamiento de la zona de influencia intertropical lo que aumenta o disminuye los volúmenes de agua caídos y de esta manera la variabilidad climática tiene un efecto mayor para esa región; por lo tanto, para determinar el efecto de la variabilidad climática sobre la precipitación es necesario tener información histórica del clima más detallada para establecer la intensidad de lluvia y de esta manera evaluar el efecto de la cobertura y prácticas de conservación, contrario a la zona delimitada en el municipio de Matagalpa – Nicaragua donde el efecto de la dinámica a lo largo de intervalos mayores a 30 años permite determinar el impacto del cambio climático en la precipitación y, consecuentemente, en las pérdidas de suelo.

Bibliografía

- Arnoldus, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Willians, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34, 73-89.
- Arnoldus, H. M. J. (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. *Assessment of Erosion*, New York, Wiley, 127-132.
- Arnoldus, H. (1977). Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. En: *Fao Conservation Guide N° 1: Guidelines for watershed management*, 99-123.
- Barrios, R. A.G. & Quiñonez, E. (2000). Evaluación de la erosión utilizando el modelo (r) USLE, con apoyo de SIG. Aplicación en una microcuenca de los andes venezolanos. *Forest*. 44 (1), 65-71.
- Bertoni, J., Lombardi Neto, F. (2012). *Conservação do solo*. 8a ed. São Paulo: Ícone
- Cabrejos, M. N. (2016). Modelamiento Geoespacial en La Determinación Del Riesgo, Vulnerabilidad y de La Cuantificación de La Erosión Hídrica en La Microcuenca Del Río Atuen – Amazonas (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Castro, M. I., López, B, W., López, H, M. A., Villar, G., & Fernando, L. (2015). Áreas de conservación en subcuencas aportadoras del sistema hidroeléctrico Grijalva, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(1), 73-87.

Chatterjee, S., Krishna, A. P., y Sharma, A. P. (2014). Geospatial assessment of soil erosion vulnerability at watershed level in some sections of the Upper Subarnarekha river basin, Jharkhand, India. *Environ Earth Sci.* 71, 357-374.

CLIMATE-DATA.ORG. (2017, Enero 30). Retrieved from DATOS CLIMÁTICOS MUNDIALES: <https://es.climate-data.org/>

Cocuyame, R. A., Salazar, D. (2015). Clasificación y zonificación de la susceptibilidad a erosión hídrica en la cuenca el río Guabas con apoyo de herramientas geomáticas (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. (1962). Guía rápida temática para el usuario SIG, Conflicto por uso del suelo. Grupo de proyectos. Cali, Colombia, 1–5.

CORTOLIMA, & CORPOICA. (1996). Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE – MUSLE) - Plan de Ordenación y manejo de la Cuenca Hidrográfica mayor del Río Totare. PERDIDA DE SUELOS. Retrieved from https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/m_212perdida_de_suelos_totare.pdf.

Da Silva, M., Silva, M. L., Curi, N., Avanzi, J., & Leite, F. (2011). Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. *Ciência Florestal*, 21(4), 765–776.

Desmet, P. J. J., Govers, G. A. (1996). GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *J. Soil Water Conserv.* 51, 427-33.

Department of irrigation and Drainage (DID). (2010). Guideline for erosion and sediment control in Malaysia. Department of Irrigation and Drainage (DID), Jalan Sultan Salahuddin, Malaysia.

Edeso, J. M., Marauri, P., Merino, A., & González, M. J. (1997). Determinación de la tasa de erosión hídrica en función del manejo forestal: la cuenca del río Santa Lucía (Gipuzkoa). *Lurralde* 20, 67-104.

El Jazouli, A., Barakat, A., Abdessamad, G., El Moutaki, S., Ettaqy, A., Khellouk, R. (2017). Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco). *Geoscience Letters* 4, 1-12.

Elsheikh, R. F., Ouerghi, S., Elhag, A. R. (2015). Soil Erosion Risk Map Based on Geographic Information System and Universal Soil Loss Equation (Case study: Terengganu, Malaysia). *Ind. J. Sci. Res and Tech* 3 (2), 38-43.

Erencin, Z. (2000). C-factor mapping using remote sensing and GIS: a case study of LOM Sak/ Lom Kao, Thailand. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Holland.

Environmental Systems Research Institute - ESRI. ArcGIS Desktop [computer program]. Version 10.5. 2016.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS). Global soil status, processes and trends. In Food and Agriculture Organization of the United Nations (Eds.), *Status of the World's Soil Resources* (pp. 101-110), Rome, Italy: FAO.

FAO. 2002. FAO/UNESCO Digital Soil Map of the World and derived soil properties. Land and Water Digital Media Series #1 rev 1. FAO, Roma.

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.

Flanagan, D.C., Nearing, M. A. (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Rep. No. 10. West Lafayette, IN: National Soil Erosion Research Lab, United States Department of Agriculture, USA.

Foster, G.R., McKool, D.K. Renard, K.G. and Kinnel, P.I.A. (1981). Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation* 11 (12), 355-359.

Gallego, C. E. (2016). Trincho en guadua, y su optimización con enfoque bioingenieril para el control de la erodabilidad hídrica en el Ecoparque los Alcázares (tesis de especialización). Universidad Católica de Manizales, Manizales, Colombia.

García, J. L. (2011). Curso Básico de Hidráulica Fluvial (diapositivas en Power Point). Recuperado de: https://imta.gob.mx/potamologia/images/stories/ponencias_tercer_seminario/dr_jose_garcia_procesos_erosivos/procesos_erosivos_modelos_2.pdf

Gaitán, J., Navarro, M., Tenti, L., Pizarro, M., Carfagno, P. and Rigo, S.(2017). 1st ed. [ebook] Buenos Aires: INTA, pp.1-5. Available at: https://inta.gob.ar/sites/default/files/libro_erosion_hidrica_rep_argentina.pdf [Accessed 30 May 2018].

Gómez, F. (2002). Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica. Trabajo de Graduación: Licenciado en Ingeniería Civil. UCR. San José, Costa Rica. 191.

Hengl, T., De Jesus, J. M., Macmillan, R. A., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Ribeiro, E., Samuel – Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J. G. B., Walsh, M., Gonzalez, M. R. (2014) SoilGrids1km - Global Soil Information Based on Automated Mapping. *PLoS ONE* 9, e105992.

Howeler, R. H., Oates, C. G., Allem, A. C., Chuzel, G., Henry, G., Hershey, C. H., ... & Siroth, K. (2001). Strategic environmental assessment, an assessment of the impact of cassava production and processing on the environment and biodiversity. In *Proceedings of the Validation Forum on the global Cassava Development Strategy (Vol. 5)*. UN-FAO. Rome. Italy.

ISRIC world soil information. (2017). SoilGrids (versión 5.1) [software]. Obtenido de https://soilgrids.org/#!//?layer=TAXNWRB_250m&vector=1

Koutalakis, P., Vlachopoulou, A., Zaimis, G. N., Ioannou, K., y Jacoboglou, B. (2015). Evaluar el riesgo de erosión del suelo utilizando USLE con GIS y SWAT para la isla de Thassos, Grecia. *Conferencias Panhelénicas e Internacionales Geográficas, Colección de Prácticas*, 610-621.

Kizilelma, Y., Karabulut M. (2014). Mut Havzasında Erozyona Duyarlı Alanların Belirlenmesi. *The Journal of International Social Research*, 7(31), 439-455.

Kuok, K. K., Mah, D. Y. S., & Chiu, P. C. (2013). Evaluation of C and P factors in universal soil loss equation on trapping sediment: case study of Santubong River. *Journal of Water Resource and Protection* 5, 1149-1154.

- Lianes, E., Marchamalo, M., Roldán, M. (2009). 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* 33, 217-235.
- Matheron, G. (1971). *The theory of regionalized variables and its applications*. Fontainebleau: École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Mendoza, I. C. (2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería hidráulica y Ambiental* 2, 3-16.
- McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1989). Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of ASAE* 32 (5), 1571–1576.
- McCool, D.K.; Brown, L.C.; Foster, G.R. (1987). Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE* 30 (5), 1387-1396.
- Montes-León, M. A. L., Uribe-Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de erosión potencial. *Tecnología y ciencias del agua*, 2 (1), 5-17.
- Morales, A. M., Saborío, J., Brenes, C. (2014). Artículo I. Estimación de la erosión hídrica laminar en tres escenarios relacionados con la cobertura vegetal y las prácticas de conservación de suelos en una cuenca de la unidad hidrográfica Aquin /Louis du Sud Haití. Tesis (Mag. Sc. en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas) -- CATIE. Escuela de Posgrado, Turrialba (Costa Rica).
- Morgan, R. P. C. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. España. Mundi – prensa Libros S. A.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2000). Erosion Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas Agricultural Experiment Station, 625.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. (2005). Erosion Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas Agricultural Experiment Station, 625.
- LA PRENSA. (2015, 24 Abril). Cambio climático produce “variaciones extremas” de temperatura en Nicaragua [Comunicado de prensa]. Recuperado 30 mayo, 2018, de <https://www.laprensa.com.ni/2015/04/24/nacionales/1820780-cambio-climatico-produce-variaciones-extremas-de-temperatura-en-nicaragua>
- Páez, M. L. (1989). Clasificación de los riesgos de erosión hídrica con fines de planificación agrícola. In Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo, 10, Maturín (Venezuela), 2-8 Jul 1989. UDO-MONAGAS-EIA.
- Pacheco, H., Marcano, A., Cartaya, S. (2014). Cálculo del factor C de la USLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo Venezuela usando imágenes del Satélite Miranda VRSS-1. XVI Simposio Internacional SELPER 2014, Medellín, Colombia.
- Pando, M. M., Gutiérrez, G. M., Maldonado, H. A., Palacio, P. J. L., & Estrada, A. E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones geográficas* 51, 23-36.
- Panagos, P., Borelli, P., Meusburger, K., Van der Zanden, E. H., Poesen, J., Alewell, C. (2015). Modelling the effect of support practices (p - factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy* 51, 23-34.
- Prajapati, R. (2010). Estimation of Soil Erosion by Using USLE. *Civizoic* 1, 1-5.

- Prosdocimi, M., Tarolli, P., Cerdá, A. (2016). Mulching practices for reducing soil water erosion: A review. *Earth – Science Reviews* 161, 191-203.
- Ramirez, J.; Jarvis, A. (2008). High Resolution Statistically Downscaled Future Climate Surfaces. International Center for Tropical Agriculture (CIAT); CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Cali, Colombia.
- Renard, K. G., Forest, G. R., Weesies, D. K., McCool, and Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE).
- Rojas, P. D., & Villegas, Z. P. (2016). Determinación de Pérdida de Suelo bajo Distintas Prácticas de Ganadería Altoandina. UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS FACULTAD. Bogota, Colombia, 2016.
- Saborío, J. (2002). Informe final: Estudio erosión potencial, cuenca del río Savegre, Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad, ICE. San José, Costa Rica. 41.
- Somarriba, M., Obando, M., Beltrán, J. A. (2005) Manual de Métodos Sencillos para estimar Erosión Hídrica. Recuperado de <https://es.slideshare.net/marcosalas/1180647717manual-de-erosion>.
- Sonder, K. (2002). Soil Erosion In Andean Cropping Systems: The impact of rainfall erosivity. Recuperado de: <http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2004/55/pdf/dksonder.pdf>
- Suryawansahi, V., Manaswini, D., Pravalika, P. (2017) Environmental Assessment of Soil Erosion on Lakanavaram Lake. *Global Journal of Engineering and Researches* 4, 1-5.
- Tosic, R., Dragicevic, S., Kostadinov, S., & Dragovic, N. (2011). Assessment of soil erosion potential by the USLE method: Case study, Republic of Srpska - BiH. *Fresenius Environmental Bulletin* 20, 1910–1917.
- Durán, V. H., Rodríguez, C. R. (2008). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA 28, 65-86.
- Wall, G.J., Coote, D.R., Pringle, E.A., Shelton, I.J. (Eds.), (2002). *Research Branch Agriculture and Agri-Food*, Ottawa, Canada, 117, Contribution No. AAFC/AAC2244E
- Williams, J.R. (1995) Chapter 25: The EPIC model. In V.P. Singh (ed.) *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, 909-1000.
- Wischmeier, W. H., y Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning. US. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook* 537.
- Yuan, L. F, Yang, G. S, Zhang, Q. F, Li, H. P. (2016). Soil Erosion Assessment of the Poyang Lake Basin, China: Using USLE, GIS and Remote Sensing. *J Remote Sensing & GIS* 5 (168), 2-12.
- Zhu, M. (2015) Soil erosion assessment using USLE in the GIS environment: a case study in the Danjiangkou reservoir region, China. *Environ Earth Sci* 73, 7899-7908.

Anexos

Anexo 1: Valores de C de acuerdo al tipo de cobertura y manejos para la zona de estudio delimitada del municipio de Popayán - Cauca – Colombia.

Coberturas	Factor C		Referencia
	2014*	2014 - Escenario**	
Ríos y lagos	0.000	0.000	Yuan et al. (2016)*,**
Arbustales	0.200	0.050	Mendoza (2013)*; El Jazouli et al. (2017)**
Bosques	0.003	0.001	CVC (1962)*; Lianes et al. (2009)**
Pastos árbolados	0.100	0.002	Lianes et al. (2009)*; El Jazouli et al. (2017)**
Café con sombra	0.090	0.010	CORTOLIMA & CORPOICA. (1996)*; Gallego (2016)*
Herbazales	0.025	0.010	Gallego (2016)*; Pacheco et al. (2014)**
Potrerros	1.000	0.016	Lianes et al. (2009)*; CVC (1962)**
Rastrojos	1.000	0.026	CORTOLIMA & CORPOICA. (1996)*; CVC (1962)**
Invernaderos	0.300	0.005	Tosic et al. (2011)*; Saborío 2002**, Gómez 2002**
Suelos degradados	1.000	0.010	Tosic et al. (2011)*; CVC (1962)**
Caña	0.560	0.130	Tosic et al. (2011)*; Pacheco et al. (2014)**
Infraestructuras, viviendas	1.000	1.000	Prajapati (2010)*; Pacheco et al. (2014)**
Pastos	0.150	0.008	Tosic et al. (2011)*; FAO 1989**
Café	0.300	0.180	CORTOLIMA & CORPOICA. (1996)*; FAO,(1989)**
Guaduales	0.014	0.001	CORTOLIMA & CORPOICA (1996)*,**
Cultivos (Café , yuca y platano)	0.435	0.050	Pacheco et al. (2014)*; Koutalakis et al. (2015)**
Cultivos (Café , caña, plátano)	0.435	0.050	Pacheco, et al. (2014)*; Koutalakis et al. (2015)**
Helechal	0.200	0.050	Mendoza, (2013)*; El Jazouli, et al. (2017)**

Anexo 2: Valores de C de acuerdo al tipo de cobertura para el año 2014 para la zona de estudio delimitada en el departamento de Matagalpa – Nicaragua.

Coberturas	Factor C		Referencia
	2014*	2014 - Escenarios**	
Agroforestal, cafetales con sombra	0.090	0.010	CORTOLIMA & CORPOICA. (1996)*; Gallego (2016)*
Arbustal latifoliado, principalmente deciduo	0.025	0.01	Gallego (2016)*,**
Arbustal latifoliado, siempre verde estacional	0.003	0.001	Gallego (2016)*,**
Áreas de ganadería extensiva arbolada 25-50%	0.15	0.01	Cabrejos (2016)*; Cocuyame & Quintero, 2015**
Bosque tropical deciduo latifoliado de bajura o submontaño	0.006	0.001	Gallego (2016)*,**
Bosque tropical deciduo latifoliado de bajura o submontaño, moderadamente intervenido	0.06	0.01	Gallego (2016)*,**
Bosque tropical semideciduo latifoliado aluvial de galería	0.003	0.001	Cabrejos (2016)*,**

Coberturas	Factor C		Referencia
	2014*	2014 - Escenarios **	
Bosque tropical semideciduo latifoliado, ondulado a accidentado, bien drenado	0.003	0.001	Gómez (2002)*,**
Bosque tropical siempre verde estacional aluvial, estacionalmente anegado o saturado dominado por bambú	0.037	0.003	Lianes et al. (2009)*,**
Bosque tropical siempre verde estacional latifoliado aluvial de galería	0.003	0.001	Cabrejos (2016)*,**
Bosque tropical siempre verde estacional latifoliado de bajura, plano (aluvial), moderadamente drenado e intervenido	0.1	0.01	Gómez (2002)*,**
Bosque tropical siempre verde estacional latifoliado montano bajo	0.004	0.0001	Tosic et al. (2011)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Bosque tropical siempre verde estacional latifoliado riberino	0.003	0.0001	Lianes et al. (2009)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Bosque tropical siempre verde estacional latifoliado submontano	0.002	0.0001	Castro et al. (2015)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Bosque tropical siempre verde estacional mixto submontano	0.002	0.0001	Castro et al. (2015)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Bosque tropical siempre verde latifoliado aluvial de galería	0.002	0.0001	Castro et al. (2015)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Bosque tropical siempre verde latifoliado de bajura ondulado a accidentado, bien drenado	0.002	0.0001	Castro et al. (2015)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Bosque tropical siempre verde latifoliado de bajura, plano (aluvial), moderadamente drenado	0.002	0.0001	Castro et al. (2015)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Bosque tropical siempre verde latifoliado pantanoso	0.002	0.0001	Castro et al. (2015)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Bosque tropical siempre verde latifoliado pantanoso dominado por palmas	0.75	0.0001	Montes-León et al. (2011)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Bosque tropical siempre verde latifoliado submontano	0.75	0.0001	Montes-León et al. (2011)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Bosque tropical siempre verde latifoliado, aluvial, ocasionalmente anegado o saturado	0.002	0.0001	Castro et al. (2015)*; Bertoni and Lombardi Neto (2012)**
Centros poblados	0.250	0.200	Howeler et al. (2001)
Deslizamiento de rocas con escasa vegetación	1.000	0.010	Tosic et al. (2011)*; CVC (1962)**
Embalse	1.000	0.000	Garcia (2011)*; Yuan et al. (2016)
Estuario abierto del Caribe	0.000	0.000	Yuan et al. (2016)
Laguna costero aluvial, predominantemente agua dulce	0.000	0.000	Yuan et al. (2016)
Laguna tectónica	0.000	0.000	Yuan et al. (2016)
Manglar limoso del Caribe	0.015	0.010	Morales et al. (2014)*; DID (2010)**
Mosaico de vegetación costera de transición	0.000	0.000	Yuan et al. (2016)
Playa tropical escasamente vegetada	1.000	0.010	Tosic et al. (2011)*; CVC (1962)**
Sabana anegada de graminoides altos con árboles latifoliados y presencia significativa de palmas	0.030	0.003	Gómez (2002)*,**

Coberturas	Factor C		Referencia
	2014*	2014 - Escenarios **	
Sabana de gramínoles cortos de arbustos deciduos	0.010	0.008	Pacheco et al. (2014)*; Morales et al. (2014)**
Sabana inundable, de gramínoles cortos, arbolada de pinos	0.005	0.001	Howeler et al. (2001)*; CVC (1962)**
Sabana permanentemente inundada, de gramínoles cortos sin cobertura leñosa	0.100	0.008	Pacheco et al. (2014)*; Morales et al. (2014)**
Sistemas agropecuarios con 10-25% de vegetación natural	0.15	0.1	Gallego (2016)*, Gallego (2016)**
Sistemas agropecuarios con 25-50% de vegetación natural	0.025	0.01	Cabreros (2016)*; Cocuyame & Quintero, 2015**
Sistemas agropecuarios intensivos	0.1	0.003	Rojas y Villegas, (2016); Gallego (2016)**
Vegetación costera de transición pantanosa	0.380	0.280	DID (2010)*; Kizilelma and Karabulut, 2014**

Anexo 3: Factor P para la zona de estudio delimitada en el municipio de Popayán - Cauca – Colombia de acuerdo a las diferentes coberturas de suelo y prácticas de conservación.

Coberturas	Factor P - 2014	Referencias
Ríos y lagos	0	Yuan et al. (2016)
Arbustales	1	Morales (2014)
Bosques	0.8	Yuan et al. (2016)
Pastos arbolados	1	Rojas y Villegas (2016)
Café con sombra	0.5	Elsheikh et al. (2015)
Herbazales	1	Morales (2014)
Potreros	1	Rojas y Villegas (2016)
Rastrojos	0.9	Prajapati (2010)
Invernaderos	1	Edeso (1997)
Suelos degradados	1	Prajapati (2010)
Caña	0.37	Koutalakis et al. (2013)
Infraestructuras, viviendas	1.3	Koutalakis et al. (2013)
Pastos	1	Rojas y Villegas (2016)
Café	0.5	Elsheikh et al. (2015)
Guadales	1	Morales (2014)
Cultivos (Café, yuca y plátano)	0.33	Yuan et al. (2016)
Cultivos (Café, cana, plátano)	0.33	Yuan et al. (2016)
Helechal	1	Morales (2014)