



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA ↓
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE TITULACIÓN

Estimación de la erosión de los suelos e identificación de las
zonas más vulnerables en la hoya de la Ciudad de Loja

Autora: Rojas Ramírez, Gabriela Vanessa

Director: Fries, Andreas Erwin

LOJA - ECUADOR
2021



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2021

Aprobación del director del Trabajo de Titulación

Loja, 27, de septiembre, de 2021

Magíster

Belizario Amador Zarate Torres

Coordinador de la Titulación

Ciudad. -

De mi consideración:

El presente Trabajo de Titulación denominado: Estimación de la erosión de los suelos e identificación de las zonas más vulnerables en la hoya de la Ciudad de Loja realizado por Gabriela Vanessa Rojas Ramírez, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo. Así mismo, doy fe que dicho Trabajo de Titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Firma del director del Trabajo de Titulación

PhD. Andreas Erwin Fries

C.I.: 1723935944

Declaración de autoría y cesión de derechos

“Yo, Gabriela Vanessa Rojas Ramírez, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

- Ser autor(a) del Trabajo de Titulación denominado: Estimación de la erosión de los suelos e identificación de las zonas más vulnerables en la hoya de la Ciudad de Loja, específicamente de los contenidos comprendidos en: Introducción, Capítulo 1. Área del estudio, datos y materiales, como la metodología aplicada en la investigación. Capítulo 2. Resultados obtenidos y discusión. Capítulo 3. Conclusiones y Recomendaciones, siendo el PhD. Andreas Erwin Fries, director el presente trabajo; y, en tal virtud, eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual. Además, ratifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo son de mi exclusiva responsabilidad.
- Que mi obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.
- Autorizo a la Universidad Técnica Particular de Loja para que pueda hacer uso de mi obra con fines netamente académicos, ya sea de forma impresa, digital y/o electrónica o por cualquier medio conocido o por conocerse, sirviendo el presente instrumento como la fe de mi completo consentimiento; y, para que sea ingresada al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Autor: Gabriela Vanessa Rojas Ramírez

C.I.: 110547244-1

Dedicatoria

El presente trabajo de fin de titulación se lo dedico a mis padres Reinaldo y Rocío, quienes a lo largo de estos años me dedicaron todo su amor, esfuerzo y comprensión, demostrándome que a pesar de los obstáculos se puede salir adelante y cumplir todas las metas que me proponga.

Gabriela Vanessa.

Agradecimiento

Primeramente, agradezco a Dios por darme la vida, protegerme a lo largo de mi existencia y ser mi gran fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

Agradezco a mis padres por los valores y consejos inculcados, por enseñarme a no temer a las adversidades y hacerme una mejor persona.

Agradezco a mi hermanita Ivanna por ser mi cómplice, mi mejor amiga, y apoyarme cuando más lo necesitaba. A mi hermano Alex por enseñarme a cuidarme sola.

Agradezco a mis angelitos en cielo Carmen, Adán, Honorato e Irene, los llevo siempre en mi corazón.

A mis sobrinitos Dyland, Bethsabe y Emilia, gracias por alegrar mis días con sus ocurrencias.

A mi tía Ulvia por ser mi segunda madre, a Karina por brindarme su amistad, a mi abuelita Angélica por su amor incondicional y a toda mi familia.

A mis amigos de la carrera con quienes sufrimos y nos desvelamos, pero también forjamos una amistad verdadera, en especial a Michael quien supo cuidarme cuando mi salud se quebrantaba.

Agradezco a mi director de tesis PhD. Andreas Fries, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo

Finalmente agradezco a una de las personas más importantes de mi vida, mi enamorado Gustavo, quien durante estos años de carrera supo ser un pilar fundamental al apoyarme y darme fuerzas para no rendirme. Gracias porque a pesar de mis problemas estuviste ahí dándome la mano para salir adelante, te amo infinitamente.

Índice de contenidos

| | |
|--|-----|
| Carátula..... | I |
| Aprobación del director del Trabajo de Titulación..... | II |
| Declaración de autoría y cesión de derechos..... | III |
| Dedicatoria..... | V |
| Agradecimiento..... | VI |
| Índice de contenidos..... | VII |
| Resumen..... | 1 |
| Abstract..... | 2 |
| Introducción..... | 3 |
| Capítulo uno..... | 5 |
| Materiales y Métodos..... | 5 |
| 1.1. Área de estudio..... | 5 |
| 1.2. Datos y materiales..... | 6 |
| 1.3. Metodología..... | 9 |
| 1.3.1. <i>Factor erosividad de la lluvia R</i> | 10 |
| 1.3.2. <i>Factor de erodabilidad del suelo K</i> | 12 |
| 1.3.3. <i>Factor de relieve LS</i> | 15 |
| 1.3.4. <i>Factor de cobertura vegetal C</i> | 15 |
| 1.3.5. <i>Clasificación de las áreas más vulnerables</i> | 16 |
| Capítulo dos..... | 18 |
| Resultados y Discusión..... | 18 |
| 2.1. Factor erosividad de la lluvia R..... | 18 |
| 2.2. Factor de erodabilidad del suelo K..... | 19 |
| 2.3. Factor de relieve LS..... | 20 |
| 2.4. Factor de cobertura C..... | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5. Factor de prácticas de conservación del suelo P | 23 |
| 2.6. Estimación de la pérdida potencial del suelo A | 23 |
| Conclusiones | 27 |
| Recomendaciones | 28 |
| REFERENCIAS | 29 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1.Coordenadas y alturas de las estaciones meteorológicas | 6 |
| Tabla 2.Valores de CN para cada tipo de cobertura..... | 11 |
| Tabla 3. <i>Porcentajes de Arena, Limo y Arcilla según la textura del suelo</i> | 13 |
| Tabla 4. <i>Porcentajes de MO según la cobertura vegetal del suelo</i> | 14 |
| Tabla 5. <i>Valores de C según el tipo de cobertura del suelo</i> | 16 |
| Tabla 6. <i>Clasificación de la erosión según el rango numérico</i> | 17 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.MDE de la Ciudad de Loja, con la ubicación de las estaciones meteorológicas..... | 5 |
| Figura 2.Mapa de suelos | 7 |
| Figura 3.Mapa de uso de suelos. | 8 |
| Figura 4a.Índice Modificado de Fournier | 19 |
| Figura 4b.Factor de erosividad de la lluvia R | 19 |
| Figura 5.Factor de erodabilidad del suelo K | 20 |
| Figura 6.Factor de relieve LS | 21 |
| Figura 7. Factor de cobertura vegetal C..... | 23 |
| Figura 8.Erosión potencial del suelo A..... | 24 |
| Figura 9.Grados de erosión para la Hoya de la Ciudad de Loja | 25 |
| Figura 10.Mapa de vulnerabilidad del suelo ante la erosión | 26 |

Resumen

En Ecuador estudios respecto a la erosión del suelo e identificación de zonas vulnerables es limitada, siendo el país con la tasa más alta de deforestación a nivel latinoamericano. Provocando erosión del suelo a gran escala, específicamente donde las actividades antropogénicas son evidentes. Este estudio estima la erosión de los suelos e identifica las zonas más vulnerables en la hoya de la Ciudad de Loja. Para esto, aplica la Ecuación Universal Revisada de Pérdida del Suelo (RUSLE), que utiliza información climática (Factor R), topográfica (Factor LS), de suelos (Factor K) y de cobertura (Factor C).

Los resultados indican rangos de erosión entre 0 y 6,488.44 t/ha al año, donde el 14% de la hoya presenta erosión a nivel extremo, particularmente en el norte y sur donde existe influencia antropogénica y pendientes fuertes. Debido a esto, aparte de las precipitaciones y topografía, el Factor C fue determinado como decisivo para la erosión en la zona de estudio. Se recomienda implementar planes de reforestación en zonas vulnerables, extender áreas de conservación e implementar prácticas de conservación (Factor P), específicamente en áreas agropecuarias.

Palabras claves: Erosión del suelo, RUSLE, Zonas más vulnerables.

Abstract

In Ecuador, studies regarding soil erosion and identification of vulnerable areas are limited, being the country with the highest rate of deforestation in Latin America. Causing large-scale soil erosion, specifically where anthropogenic activities are evident. This study estimates soil erosion and identifies the most vulnerable areas in the hoya of the City of Loja. For this, it applies the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), which uses climatic (Factor R), topographic (Factor LS), soil (Factor K) and cover (Factor C) information.

The results indicate erosion ranges between 0 and 6,488.44 t/ha per year, where 14% of the hole presents erosion at an extreme level, particularly in the north and south where there is anthropogenic influence and strong slopes. Because of this, apart from rainfall and topography, Factor C was determined to be decisive for erosion in the study area. It is recommended to implement reforestation plans in vulnerable areas, extend conservation areas and implement conservation practices (Factor P), specifically in agricultural areas.

Keywords: Soil erosion, RUSLE, Most vulnerable areas.

Introducción

La erosión de suelos es un fenómeno natural a escala mundial, que afecta la calidad de vida de las personas, perjudicando la producción agrícola, la fertilidad de tierras y reduce la capacidad del suelo para retener agua (Ramón y Reyes, 2005). Este proceso se intensifica debido a las actividades humanas, como construcción de vías y edificios, o la deforestación, que, aumentan el riesgo de desastres naturales (Ochoa-Cueva et al., 2015). En zonas montañosas estas actividades aumentan el riesgo de derrumbes en laderas e inundación de valles (Uddin et al., 2016; Bendix et al., 2017); provocando carga excesiva de sedimentos en los ríos (Vanacker et al., 2007). El ámbito urbano y sus alrededores también se ve afectado por las actividades humanas (cambio del uso de suelos), especialmente en ciudades en desarrollo, donde los habitantes dependen de la producción agrícola local. La expansión de zonas urbanas y la deforestación provocan reducción de productividad agrícola, disminución de calidad del agua potable, y daños en infraestructuras urbanas. (Encina Rojas y Ibarra, 2003; Fries et al., 2020).

Ecuador tiene la tasa más alta de deforestación en Latinoamérica (González-Jaramillo et al., 2016), es decir, degradación de suelos ya existía. El Ministerio del Ambiente Ecuatoriano (MAE, 2013) indica, que el 47% de la superficie continental es afectada por degradación, debido a actividades antropogénicas y cambio climático (MAE, 2017; IPCC, 2020). Lamentablemente, solo existe información respecto a erosión de suelos a nivel nacional y provincial, o para cuencas hidrográficas importantes (Arteaga et al., 2020), debido a que la información disponible respecto a tipos de suelo y clima es limitada (Fries et al., 2014). Los pocos puntos de muestreo y las estaciones meteorológicas generalmente están ubicadas dentro de los valles y en lugares de fácil acceso (Bendix et al., 2017), lo cual complica la estimación de la erosión de suelos. La provincia de Loja posee poca información respecto a suelos y clima, donde existen altas tasas de deforestación, debido a la expansión de la frontera agricultura, el cual es el ingreso principal de la población (Arteaga et al., 2020). Existen problemas de desertificación y sequías prolongadas en el sur de la provincia (MAE, 2015), ocasionando el éxodo rural hacia la capital provincial, la

Ciudad de Loja (Chamba-Ontaneda et al., 2019; Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2014), causado por la baja producción agrícola y escasez laboral (Villacís y Carrillo, 2012). El éxodo rural provoca expansión del área urbana no controlada, aumentando el riesgo de derrumbes e inundaciones (Mogrovejo León et al., 2018), las cuales ocurren durante la estación húmeda cuando lluvias tormentosas son muy frecuentes (Fries et al., 2014; Oñate-Valdivieso et al., 2018; Álvarez- Figueroa y Tamayo-Malacatus, 2016; OEA, 1994). En la Ciudad de Loja solo existen estudios puntuales respecto a la erosión de suelos (p.ej. Ochoa-Cueva et al., 2015), pero no se conocen las zonas más vulnerables, a pesar de que el área urbana cuenta con fuertes pendientes y actividad humana en sus alrededores. El estudio pretende llenar este vacío, aplicando el método “Revised Universal Soil Loss Equation “(RUSLE), el más utilizado internacionalmente (Wischmeier y Smith, 1978; Renard et al., 1997; FAO, 2019). RUSLE usa datos topográficos, de precipitación, de cobertura y diferentes parámetros del suelo que permite la obtención de mapas de alta resolución espacial con respecto a la erosión potencial de suelos.

En base del mapa de erosión de suelos generado se puede identificar las zonas más vulnerables e implementar acciones de mitigación, incluyendo obras civiles, y la conservación de áreas protegidas o de reforestación. Además, el mapa de vulnerabilidad resultante respecto a la erosión de suelos pretende fortalecer al gobierno local en la planificación del desarrollo sustentable de la Ciudad. Esta meta está relacionada con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) no. 15, que busca, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con efecto neutro en la degradación del suelo (ONU, 2020). El documento está estructurado de la siguiente manera: En el capítulo 1, denominado “Materiales y Métodos”, se describe el área de estudio y se indican los datos y materiales utilizados, como también se detalla la metodología aplicada para esta investigación. En el capítulo 2 se presentan los resultados obtenidos con su respectiva discusión. El trabajo termina con conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

Capítulo uno

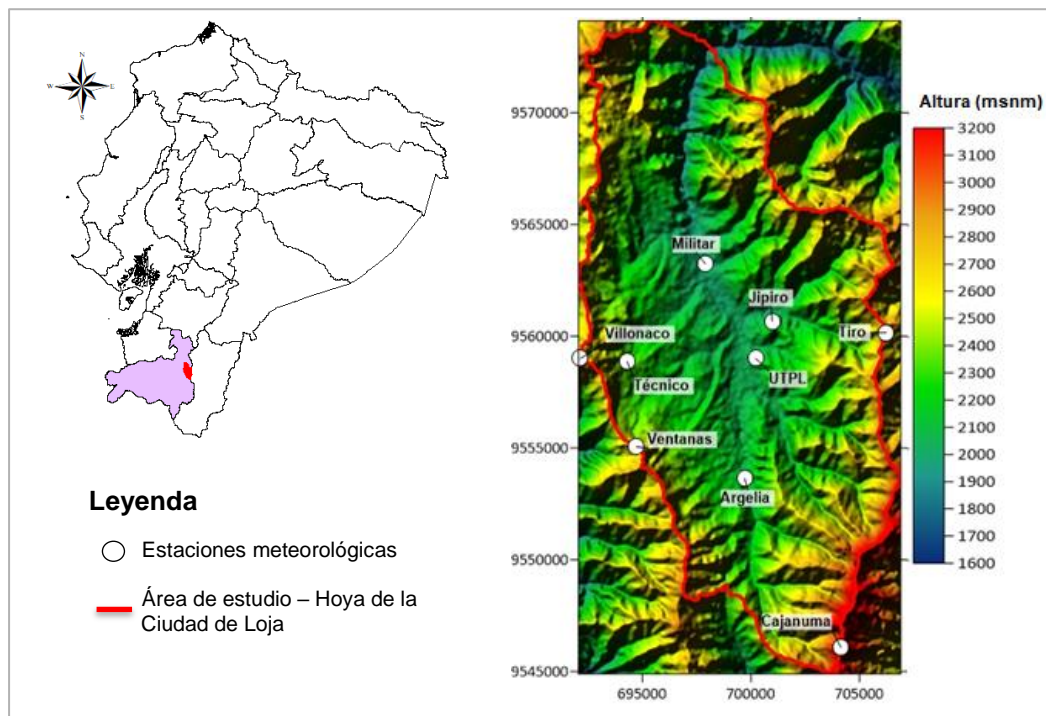
Materiales y Métodos

1.1. Área de estudio

La hoya de la Ciudad de Loja está ubicada en los Andes al sur del Ecuador, entre las coordenadas UTM 17S 689996–708246 y 9543362–9576862 (Figura 1). La hoya tiene un área de 285 km² y está caracterizado por una topografía irregular, debido a que está rodeada por un conjunto de colinas con elevaciones hasta 3,600 msnm (PNUMA, 2007). El clima en el área de estudio es per húmedo, con fuertes gradientes altitudinales de temperatura y precipitación. Dentro de valle (aprox. 2,000 msnm) la temperatura media anual es alrededor de 16°C y las precipitaciones medias anuales fluctúan entre los 700 a 800 mm (Samaniego-Rojas et al., 2015), mientras que en las cumbres la temperatura media anual es alrededor de 7°C con precipitaciones medios anuales sobre 2500 mm (Consortio formado por la Fundación para la Investigación del Clima Universidad Técnica Particular de Loja y LAVOLA S. A., 2019).

Figura 1

MDE de la Ciudad de Loja, con la ubicación de las estaciones meteorológicas.



La vegetación nativa en la hoya de la Ciudad de Loja es bosques de montaña tropical y páramos en las cumbres. Sin embargo, debido a la actividad antropogénica, particularmente en las partes medias y bajas, plantaciones forestales, pastizales y tierras agropecuarias son frecuentes. Los suelos en las partes medias y altas tienen alto contenido de materia orgánica, debido a las bajas temperaturas que retrasan la descomposición, mientras que en las partes bajas suelos arcillosos y limosos predominan (Ochoa-Cueva et al., 2015).

1.2. Datos y materiales

Los datos meteorológicos respecto al periodo 2010 - 2020, específicamente de las precipitaciones diarias, fueron facilitados por la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL, 6 estaciones), de la Fundación Alemana de Investigación (DFG, proyecto RESPECT, 2 estaciones) y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 1 estación). La ubicación de las estaciones se indica en la Figura 1 y las coordenadas específicas de cada estación, así como su altura, el periodo de datos disponibles y la entidad operador se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1

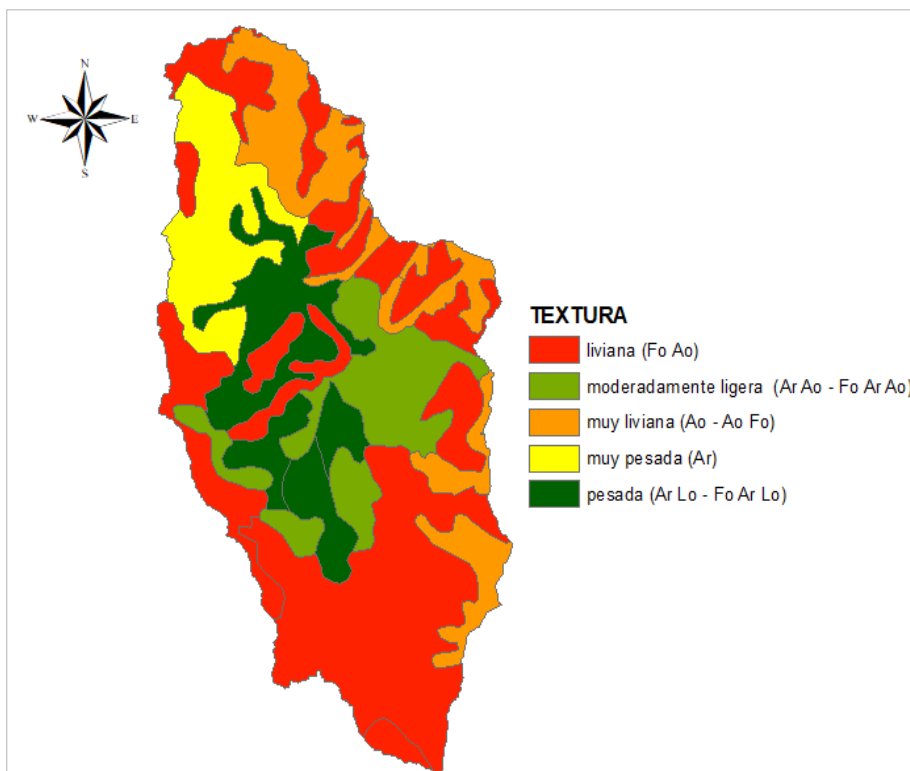
Coordenadas y alturas de las estaciones meteorológicas

| Estación | UTMX | UTMY | Altura | Período de datos disponibles | Entidad |
|-----------------|-------------|-------------|---------------|-------------------------------------|----------------|
| Argelia | 699711 | 9553629 | 2160 | 2010 – 2018 | INAMHI |
| Cajanuma | 704140 | 9546097 | 3410 | 2010 – 2017 | DFG |
| Jipiro | 700975 | 9560679 | 2218 | 2010 – 2020 | UTPL |
| Militar | 697901 | 9563240 | 2033 | 2010 – 2020 | UTPL |
| Técnico | 694294 | 9558872 | 2377 | 2010 – 2020 | UTPL |
| Tiro | 706230 | 9560170 | 2850 | 2010 – 2017 | DFG |
| UTPL | 700210 | 9559009 | 2159 | 2010 – 2020 | UTPL |
| Ventanas | 694716 | 9555060 | 2816 | 2010 – 2017 | UTPL |
| Villonaco | 692138 | 9559012 | 2952 | 2010 – 2020 | UTPL |

El mapa de suelos para el área de estudio fue generado por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA, 2011; Figura 2) a través de ortofotos con resolución de 50 m y estudios de calicatas. Los diferentes tipos de suelo fueron clasificados según el método americano Soil Survey Staff (2006) que incluye también la textura de los suelos (porcentajes arena, limo y arcilla).

Figura 2

Mapa de suelos

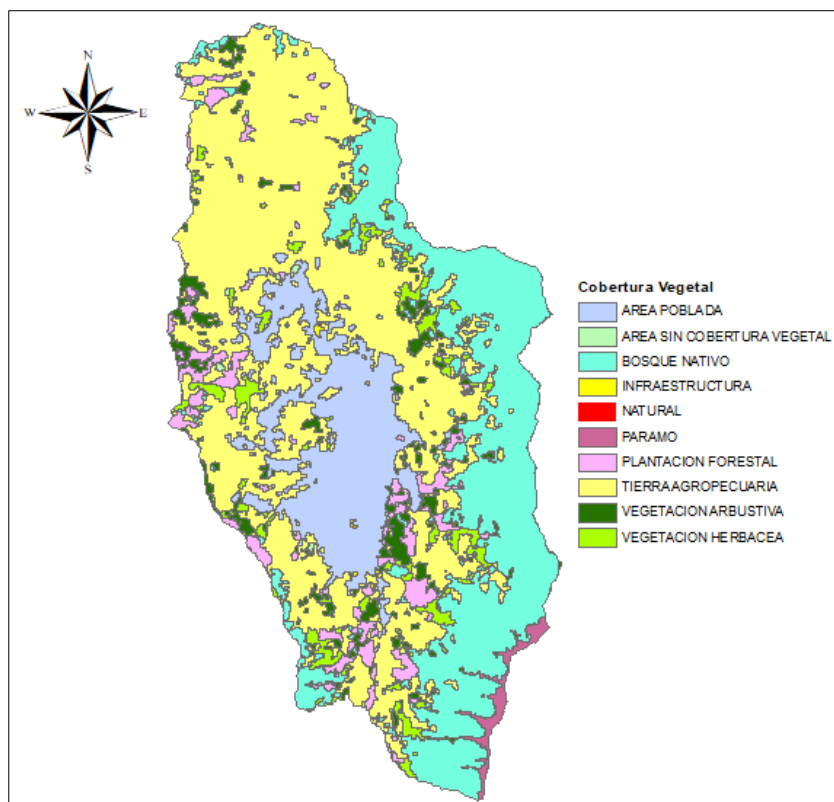


Nota. Mapa adaptado de SENAGUA (2011)

El mapa de la cobertura (uso de suelo) a escala 1:100.000 fue generado mediante imágenes satelitales por el MAE (2018), aplicando técnicas de extracción y un sistema de información geográfica, la cual fue ajustado a la misma resolución del mapa de suelos mediante el software ArcGIS 10 para este estudio (ESRI, 2012; Figura 3).

Figura 3

Mapa de uso de suelos.



Nota. Mapa adaptado de MAE (2018)

Además, se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) de la hoya de la Ciudad de Loja (Figura 1), lo cual fue descargado del sitio web de la NASA en resolución de 30m x 30m (<https://search.earthdata.nasa.gov>; SRTM Plus V3; 2013), y ajustado a la misma resolución que los otros mapas.

Para el análisis de datos de precipitación, textura de los suelos y cobertura del suelo, se utilizaron las siguientes herramientas auxiliares:

- El Software Excel (Microsoft Office, 2016) fue utilizado para el control de calidad de datos diarios de las precipitaciones y para el cálculo de la precipitación efectiva, así como para el cálculo de valores de mensuales y anuales.

- El Software ArcGIS 10 (ESRI, 2012) se utilizó para la transformación los diferentes mapas al formato ráster, para ajustar los mapas a una resolución similar (50 m) y generar los mapas temáticos. Además, en base del MDE, se obtuvo los parámetros topográficos necesarios para la ecuación RUSLE.
- El Software Surfer 16 (Golden Software Inc., 2016), fue utilizado para ejecutar las diferentes interpolaciones y operaciones matemáticas, así como para generar mapas temáticos.

1.3. Metodología

La ecuación RUSLE (Ecuación 1; Renard et al., 1997) está formado por diferentes factores, que permiten la estimación de la erosión potencial de suelos. En general, el factor R representa el efecto de las precipitaciones en la erosión, para lo cual la información meteorológica diaria de las nueve estaciones meteorológicas instalados en la hoya de la Ciudad de Loja respecto al periodo 2010 – 2020 fue utilizado (Oñate-Valdivieso et al., 2018). El factor K indica la susceptibilidad de los suelos a la erosión, que se estimó mediante el mapa de suelos, específicamente de las texturas y del contenido de la materia orgánica (SENAGUA, 2011). El factor LS especifica el efecto de la topografía en la erosión, que fue deducida en base del MDE (SRTM; Consortium for Spatial Information [CGIAR-CSI], 2018). El factor C indica el efecto de la cobertura en la erosión que fue determinada mediante el mapa de uso de suelo (MAE, 2018). El factor P representa la incidencia que tiene las prácticas de conservación respecto al suelo (p.ej. contornos, hileras, terrazas o fajas), las cuales puedan reducir la erosión de los suelos según la pendiente. Su valor varía entre 0 y 1; sin embargo, debido a que no existen prácticas de conservación en el área de estudio se consideró un valor de 1 para toda la hoya de la Ciudad de Loja (INIFAP, 2007; Ochoa-Cueva et al., 2015).

$$A_{(x,y)} = R_{(x,y)} * K_{(x,y)} * L_{(x,y)} * S_{(x,y)} * C_{(x,y)} * P_{(x,y)} \quad (1)$$

Donde:

$A_{(x,y)}$ = Pérdida potencial del suelo ($t\ ha^{-1}\ y^{-1}$)

$R_{(x,y)}$ = Erosividad causada por la lluvia ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$)

$K_{(x,y)}$ = Erodabilidad del suelo ($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)

$LS_{(x,y)}$ = Factor de longitud y pendiente

$C_{(x,y)}$ = Cobertura vegetal del suelo

$P_{(x,y)}$ = Prácticas de conservación (aquí: 1)

Para la estimación de la erosión y la identificación de las zonas más vulnerables en la hoya de la Ciudad de Loja se generaron mapas individuales en alta resolución (celda: 50 x 50m) para cada factor. El procesamiento de la generación de cada uno de los mapas, como también la clasificación de las zonas más vulnerables se detalla a continuación.

1.3.1. Factor erosividad de la lluvia R

En primera estancia, se realiza un control de calidad de los datos para evitar inexactitudes, ya que cualquier valor atípico pueda adulterar los resultados (García-Cueto et al., 2018). Para este análisis se estableció un rango confiable de las precipitaciones diarios entre 0 y 80 mm/día, como fue indicado del INAMHI Loja (comentario personal Diego Mejía, Coordinador INAMHI Loja). Todos los valores fuera de este rango se eliminaron sin relleno.

A partir de las precipitaciones diarias revisadas de cada estación, se calculó valores mensuales individuales para cada mes, si por lo menos 90% de los datos diarios de un mes específico (27 días) existían (Rodríguez Procel, 2020). En base de los valores mensuales se calculó valores medios mensuales para cada mes y estación correspondiente al periodo 2010 – 2020. Finalmente, los valores medios mensuales fueron utilizados para calcular valores medios anuales para cada estación (Fries et al., 2020). La información de la precipitación media mensual y anual de las estaciones meteorológicas de la UTPL, DFG e INAMHI (Figura 1 y Tabla 1) fueron interpolados para generar mapas de precipitación con una resolución de 50 m para la hoya de la

Ciudad de Loja, aplicando el método “Kriging ordinario” (Bendix et al., 2017), ya que no se encontró ninguna relación entre altura y precipitación en el área de estudio.

Para obtener la precipitación efectiva (Pe), la cual establece la cantidad de precipitación que causa erosión de suelos, se aplicó el método de Número de Curva (CN; Mejía-Veintimilla et al., 2019) que se basa en la cobertura (o uso de suelo) y en la permeabilidad del suelo. Según el mapa de suelos (SENAGUA, 2011; Figura 2), en el área de estudio existen suelos con permeabilidad de clase B y C, por lo que el valor CN para cada cobertura (MAE, 2018; Figura 3) fue determinado para estas clases, utilizando la clasificación de USDA (United States Department of Agriculture, 2004). Los valores aplicados de CN para cada cobertura se indica en la Tabla 2.

Tabla 2

Valores de CN para cada tipo de cobertura

| Cobertura Vegetal | Clase CN | CN |
|----------------------------|-----------------|-----------|
| Área Poblada | B | 85 |
| Área sin cobertura vegetal | B | 86 |
| Bosque Nativo | C | 70 |
| Infraestructura | B | 85 |
| Natural | B | 98 |
| Páramo | C | 65 |
| Plantación Forestal | B | 73 |
| Tierra Agropecuaria | B | 75 |
| Vegetación Arbustiva | B | 77 |
| Vegetación Herbácea | B | 71 |

Finalmente, se calculó la Pe con la Ecuación 2 (Mejía-Veintimilla et al., 2019), utilizando los mapas de precipitación mensual generados anteriormente y el valor CN respectivo de la cobertura para cada celda (x, y):

$$P_{e(x,y)} = \frac{\left(P_{(x,y)} - \frac{5080}{CN_{(x,y)}} + 50.8\right)^2}{P_{(x,y)} + \frac{20320}{CN_{(x,y)}} - 203.20} \quad (2)$$

Donde:

$Pe_{(x,y)}$ = Precipitación efectiva (mm)

$P_{(x,y)}$ = Precipitación media mensual (mm)

$CN_{(x,y)}$ = Número de curva (adimensional)0020

Para calcular la erosividad de la lluvia (Factor R), se realizó una transformación de la Pe mediante el Índice modificado de Fournier (Arnoldus,1977), como recomendado por Renard & Freimund (1994) cuando valores de la intensidad de precipitación (mm/h) no están disponibles. Para el cálculo se utilizó los mapas medios mensual de Pe ($Pemes$) y el mapa anual de Pe ($Peaño$; Ecuación 3).

$$F_{(x,y)} = \frac{\sum_1^{12} Pemes_{(x,y)}}{Peaño_{(x,y)}} \quad (3)$$

En base de los valores transformados se calculó el Factor R de la ecuación RUSLE en cada celda (x, y) para la hoya de la Ciudad de Loja, aplicando la siguiente ecuación (Ecuación 4; Ochoa-Cueva et al., 2015).

$$R_{(x,y)} = 95.77 - 6.081F_{(x,y)} + 0.4770F_{(x,y)}^2 \quad (4)$$

Donde:

$R_{(x,y)}$ = Factor de erosividad de la lluvia ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$)

$F_{(x,y)}$ = Índice modificado de Fournier (adimensional)

1.3.2. Factor de erodabilidad del suelo K

El factor K representa la vulnerabilidad del suelo ante la erosión, para lo cual se utilizó el mapa de suelos (SENAGUA,2011; Figura 2), en donde se especifica los porcentajes de cada clase de la textura (Tabla 3). Los porcentajes de arcilla, limo y arena fueron asignados según el

tipo de suelo y transformados a una resolución de 50 m mediante ArcGIS 10 (ESRI, 2012) para generar mapas individuales de cada tipo de textura.

Tabla 3

Porcentajes de Arena, Limo y Arcilla según la textura del suelo

| Textura | % Arena | % Limo | % Arcilla |
|---|----------------|---------------|------------------|
| Muy Liviana (Ao - Ao Fo) | 85 | 10 | 5 |
| Liviana (Fo Ao) | 65 | 30 | 5 |
| Muy Pesada (Ar) | 15 | 15 | 70 |
| Moderadamente Ligera (Ar Ao - Fo Ar Ao) | 50 | 15 | 35 |
| Pesada (Ar Lo - Fo Ar Lo) | 7.5 | 50 | 42.5 |
| Ligera (Lo - Fo Lo) | 7.5 | 85 | 7.5 |

Después se estimó el contenido de la materia orgánica (MO) para cada tipo de suelo. Lamentablemente, estos porcentajes no están especificados en el mapa de suelos de SENAGUA (2011), por lo que se apeló a estudios realizados por el Departamento de Agropecuaria de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). Según estos estudios, los porcentajes de MO varían entre 0 y 4%, dependiendo principalmente de la cobertura (Comentario personal de PhD. Pablo Ochoa-Cueva). Debido a esto, se asignó el valor promedio de MO respecto a cada cobertura (Figura 3) según los estudios realizados por la UTPL (Tabla 4), generando así un mapa de MO en resolución de 50 m.

Tabla 4*Porcentajes de MO según la cobertura vegetal del suelo*

| Cobertura Vegetal | Materia orgánica (%) |
|----------------------------|-----------------------------|
| Área Poblada | 0 |
| Área sin cobertura vegetal | 2.5 |
| Bosque Nativo | 3.7 |
| Infraestructura | 0 |
| Natural | 0 |
| Páramo | 3.4 |
| Plantación Forestal | 2.9 |
| Tierra Agropecuaria | 4 |
| Vegetación Arbustiva | 2.9 |
| Vegetación Herbácea | 3.4 |

Nota. Valores promedios por cobertura según estudios realizados por la UTPL

En base de los mapas generados de los porcentajes de textura (arena, limo y arcilla) y MO se calculó el Factor K para cada celda (x, y), aplicando la siguiente ecuación (Ecuación 5; Renard et al., 1997). Las variables “s” y “p” en la Ecuación 5 fueron determinados según el estudio realizado por Ochoa-Cueva et al. (2015), quienes realizaron 38 muestreos puntuales de suelo dentro de una subcuenca en la hoya de la Ciudad de Loja.

$$K_{(x,y)} = 0.277 * 10^{-6} * M_{(x,y)}^{1.14} (12 - MO_{(x,y)}) + (0.0043(s - 2) + 0.0033(p - 3)) \quad (5)$$

Donde:

$K_{(x,y)}$ = Factor de erodabilidad del suelo

$M_{(x,y)}$ = (% Limo + % Arena) * (100 - % Arcilla)

$MO_{(x,y)}$ = Materia Orgánica (%)

s = Parámetro de estructura (aquí = 2)

p = Parámetros de permeabilidad (aquí = 3.5)

1.3.3. Factor de relieve LS

El cálculo de los factores L y S se realizó a través del MDE (Figura 1), lo cual fue ajustado a una resolución espacial de 50 m mediante ArcGIS 10 (ESRI, 2012). El factor LS indica el grado de la pendiente del terreno y la longitud de la misma (aquí: 50 m), por lo cual la herramienta “Slope” del software ArcGIS 10 (ESRI, 2012) fue utilizado. La información extraída del MDE fue interpolando mediante el método “Nearest Neighbor” en software Surfer 16 (Golden Software Inc., 2016) para generar un mapa de pendientes (S) y sus longitudes (L). Las ecuaciones individuales se indican a continuación (Ecuaciones 6 y 7), según Mitsova et al. (1996) y Nearing (1997), respetivamente.

$$L = (m + 1) \left(\frac{A_{(r)}}{a_o} \right)^m \quad (6)$$

Donde:

$m = 0.5$ configurado para un terreno inclinado según Mitsova et al. (1996)

$A_{(r)}$ = Área de contribución (50 m)

$a_o = 22.1$ m (longitud de parcela estándar USLE)

$$S = -1.5 + \frac{17}{(1 + e^{(2.3 - 6.1 \sin \theta)})} \quad (7)$$

Donde:

θ = Pendiente en grados.

1.3.4. Factor de cobertura vegetal C

El Factor C indica el efecto de la cobertura a la erosión, lo cual fue asignado para cada celda (50 x 50m) según el mapa de uso de suelo (MAE, 2018; Figura 3). Los valores individuales para cada cobertura fueron determinados de estudios anteriores (Tabla 5), en base de los

resultados de Wischmeier y Smith (1978), Wang et al. (2016), Saborío (2002), Lianes et al. (2009) y Ochoa-Cueva et al. (2015).

Tabla 5

Valores de C según el tipo de cobertura del suelo.

| Cobertura Vegetal | Cobertura Vegetal |
|----------------------------|--------------------------|
| Área Poblada | 0 |
| Área sin cobertura vegetal | 1 |
| Bosque Nativo | 0.003 |
| Infraestructura | 0 |
| Natural | 0 |
| Páramo | 0.003 |
| Plantación Forestal | 0.2 |
| Tierra Agropecuaria | 0.53 |
| Vegetación Arbustiva | 0.03 |
| Vegetación Herbácea | 0.03 |

1.3.5. Clasificación de las áreas más vulnerables

Para la identificación de áreas más vulnerables en la zona de estudio, se aplicó la clasificación de Ozsoy y Aksoy (2015), quienes analizaron la vulnerabilidad de los suelos en la cuenca del río Nilufer en la provincia de Bursa (Turquía). Esta cuenca demostró un alto índice de erosión severa, lo cual también se espera en la hoya de la Ciudad de Loja debido al impacto antropogénico. La clasificación según la cantidad anual de suelo erosionado se muestra en la Tabla 6, la cual está dividido en 5 clases (bajo, moderado, alto, muy alto y extremo) (Ozsoy y Aksoy, 2015).

Tabla 6

Clasificación de la erosión según el rango numérico.

| Clase de Erosión | Rango Numérico (t ha⁻¹ y⁻¹) |
|-------------------------|--|
| Bajo | < 10 |
| Moderado | 10 – 50 |
| Alto | 50 – 100 |
| Muy Alto | 100 – 200 |
| Extremo | > 200 |

Nota: Tabla adaptada de Ozsoy y Aksoy (2015).

Capítulo dos

Resultados y Discusión

La metodología RUSLE fue aplicada para la determinación de la pérdida potencial del suelo en la hoya de la Ciudad de Loja e identificar las áreas más vulnerables, en donde datos meteorológicos, de relieve, de suelos y de la cobertura fueron incluidos. La erosión potencial del suelo fue estimada mediante mapas individuales en alta resolución (50 x 50m) de cada factor de la ecuación RUSLE (Ecuación 1). A continuación, se analizan los mapas temáticos generados de cada factor y el mapa de erosión potencial, así como se determinan las zonas más vulnerables en el área de estudio.

2.1. Factor erosividad de la lluvia R

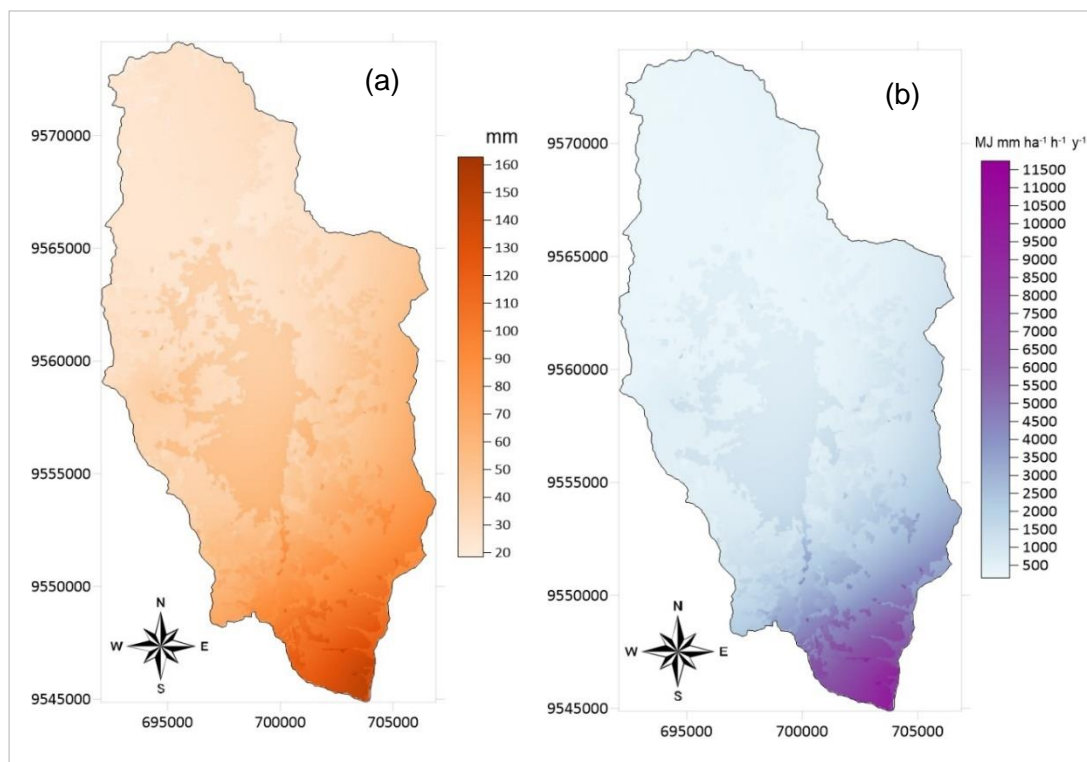
En base de la información meteorológica revisada y el CN (Tabla 2) se estimó la precipitación efectiva (P_e) en la hoya de Loja, mediante la cual se calculó el Índice Modificado de Fournier que fue utilizado para determinar el Factor R para cada celda (x, y). Los valores del Índice Modificado de Fournier variaron entre 17.94 y 162.76 (Figura 4a), en donde los valores más altos se encontraron en la parte sureste de la hoya donde las precipitaciones son mayores (Oñate-Valdivieso et al., 2018), así como en el centro de la hoya, debido a la cobertura (área poblada; Figura 3), ya que las construcciones evitan la filtración y solo se genera escorrentía.

Los resultados del factor R para la hoya de la Ciudad de Loja presentaron un rango entre 146.12 y 11,742.80 $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$ (Figura 4b), distribuyendo de la misma manera que el mapa del Índice Modificado de Fournier. Sin embargo, debido a que el centro de la hoya se encuentran áreas pobladas, el potencial de la erosión es mínimo en esta zona; más efectivo es la erosividad de la lluvia en las partes altas, específicamente en las lomas y cumbres en el sureste. El valor máximo de P_e se calculó para la estación meteorológica Cajanuma (Figura 1, Tabla 1), ubicada

en la cumbre del sureste a 3410 msnm, con un valor de Pe 1298 mm/ año y un factor R de 11,742.80 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ y⁻¹.

Figura 4

(a) Índice Modificado de Fournier; (b) Factor de erosividad de la lluvia R



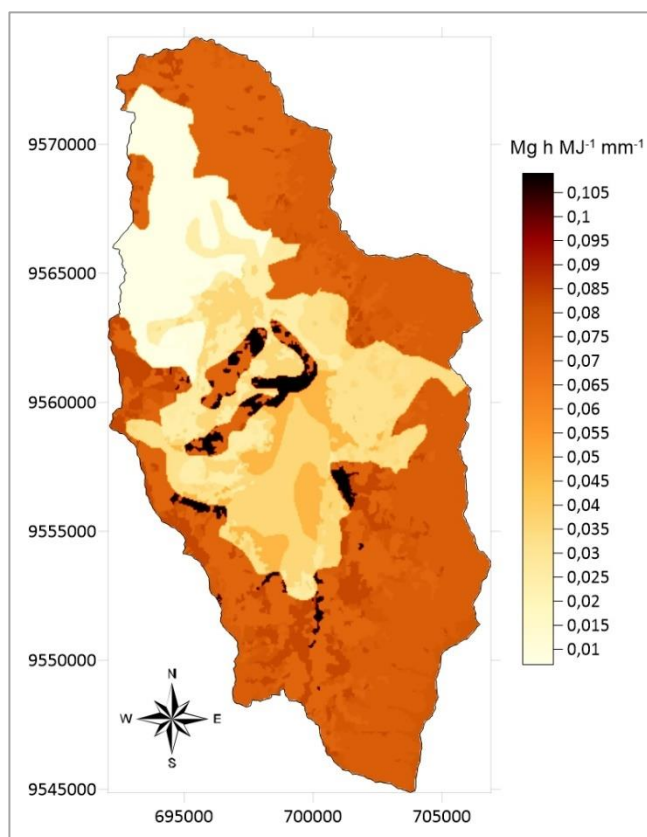
2.2. Factor de erodabilidad del suelo K

El Factor K (susceptibilidad de los suelos a la erosión; Figura 5) en la hoya de la Ciudad de Loja varió entre 0.0068 y 0.109 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, debido a las texturas de los suelos presentes, las cuales, en su mayoría, son clasificados como arenosos, arcillosos y franco arenoso (SENAGUA, 2011). Además, según los estudios de la UTPL (Tabla 3), los suelos en la hoya de Loja generalmente tienen un alto contenido de MO (mayor al 2%), debido al clima per húmido y la altura sobre el nivel del mar (bajas temperaturas; Samaniego-Rojas et al., 2015) que retarda la descomposición de este material, particularmente en las partes altas (Ochoa-Cueva et al., 2015). Sin embargo, en las zonas con influencia antropogénica (generalmente en el fondo del valle), la MO fue asignado con 0%, ya que los suelos están sellados por construcciones

antropogénicas, que evita la filtración y solo se genera escorrentía. En general, se puede resumir que el 85% de los suelos en la hoya de Loja presentan una susceptibilidad a la erosión moderada a alta (Ovalles, 2013), particularmente en áreas con tierras agropecuarias, bosques nativos y vegetación herbácea (Figura 3).

Figura 5

Factor de erodabilidad del suelo K



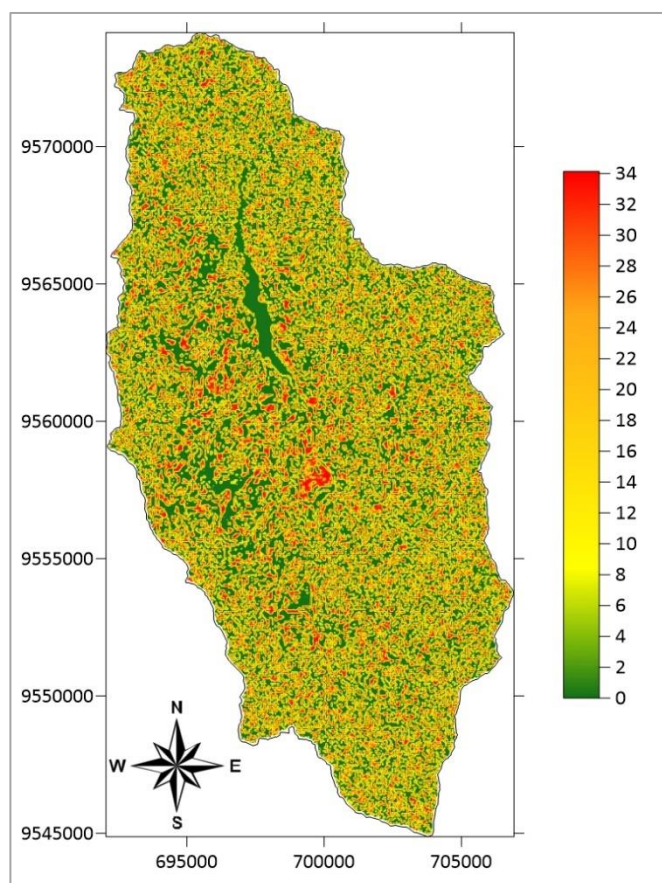
2.3. Factor de relieve LS

El mapa del factor topográfico (LS; Figura 6) mostró un rango de 0 a 34.13 (adimensional), lo cual indica la pendiente del terreno en cada celda. Los valores más bajos se encuentran en áreas planas, los cuales están ubicados generalmente en el centro de la hoya, en las cumbres o donde se encuentran ríos y quebradas (Figura 1).

Los valores más altos del factor LS indican zonas inclinadas, las cuales están ubicadas generalmente en los ascensos de las colinas montañosas que rodean la Ciudad de Loja. Sin embargo, el mapa LS (Figura 6) muestra cambios rápidos entre elevaciones y depresiones en toda la hoya, es decir el relieve no es uniforme, ya que la resolución de MDE (50m) divide las pendientes en fracciones, lo cual permite visualizar la topografía irregular en el área de estudio (Vuille et al., 2000; Rollenbeck y Bendix, 2011). En general, la hoya de la Ciudad de Loja presenta aproximadamente un 44% de pendientes muy fuertes (LS mayor a 20), específicamente en las colinas alrededor de las Ciudad de Loja, las cuales caen rápidamente hacia la el fondo del valle (Figura 1).

Figura 6

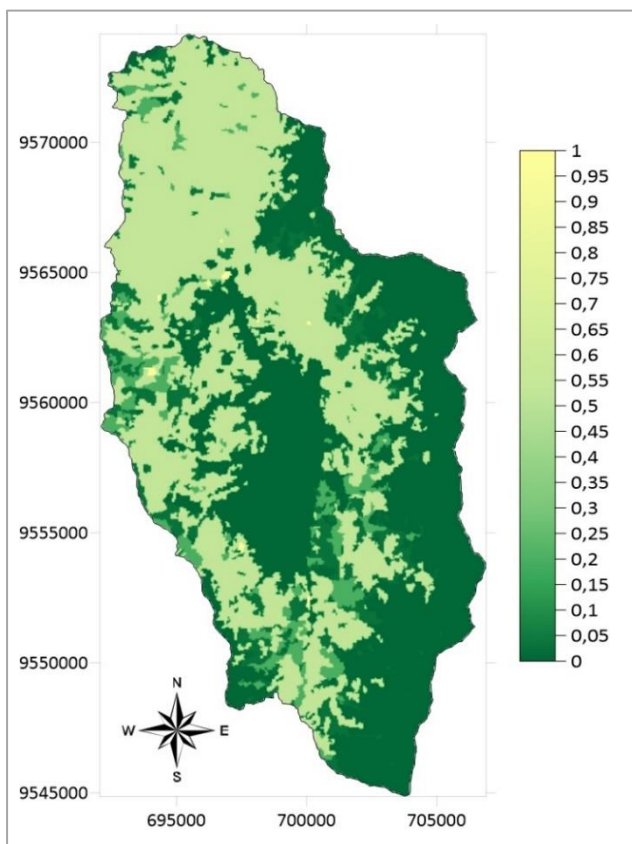
Factor de relieve LS



2.4. Factor de cobertura C

El Factor C indica la protección de la cobertura respecto a la erosión de suelos (Figura 7), lo cual está establecida en un rango de 0 a 1 (Tabla 4). Un valor de 1 indica que no existe protección para el suelo, mientras que un valor de 0 indica que no existe peligro de erosión.

Según el mapa de cobertura de MAE (2018), en la hoya de la Ciudad de Loja existen 12 tipos principales de coberturas (Figura 3), de las cuales las tierras agropecuarias con 42% del área (11,919 ha), el bosque nativo con 27% (7,197 ha) y áreas pobladas con 14% (3,865 ha) predominan. Analizando el mapa del Factor C (Figura 7), se puede identificar algunas áreas con valores cerca de 1 (color amarillo), que corresponden a suelos desnudos, donde derrumbes o construcciones recientes dejaron el suelo sin cobertura. Los valores intermedios (color verde claro) indican zonas con intervención antropogénica, como agricultura, pastos y áreas de sucesión (vegetación arbustiva y herbácea; Arteaga et al., 2020), los cuales se encuentran alrededor de la zona poblada y en las partes bajas de las colinas, así como dentro de las cuencas de los ríos secundarios y quebradas. Los bosques nativos y la vegetación natural (paramo) son generalmente coberturas densas, las cuales protegen el suelo de la erosión, por lo que valores cerca de 0 fueron establecidos (color verde oscuro; Ochoa-Cueva et al., 2015). La vegetación natural en la hoya de la Ciudad de Loja, por su mayoría, se encuentra en las partes altas de la colina oriental, donde el impacto antropogénico es menor; y particularmente en el sureste de la hoya, donde el Parque Nacional Podocarpus prohíbe la intervención humana. Por otro lado, en áreas pobladas y zonas con infraestructura humana (centro de la hoya) los valores del Factor C fueron establecidos con un valor 0 también, ya que los suelos están sellados por construcciones, las cuales protegen el suelo de la erosión (Wang et al., 2016).

Figura 7*Factor de cobertura vegetal C*

2.5. Factor de prácticas de conservación del suelo P

Los valores del Factor P tienen un rango entre 0 a 1, dependiendo de las prácticas de conservación implementadas. Como se ha mencionado antes, en la hoya de la Ciudad de Loja no existen dichas prácticas, por lo que un valor de 1 fue aplicado para toda el área de estudio.

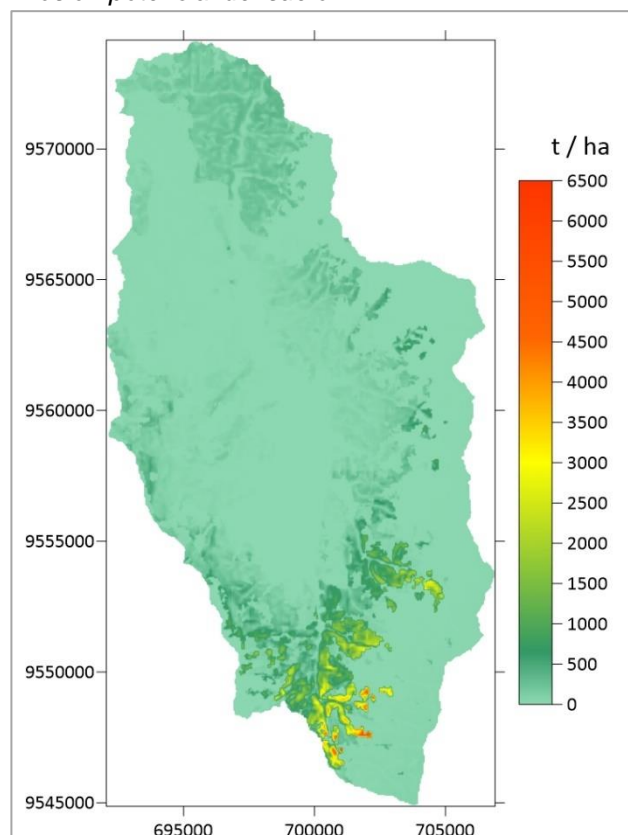
2.6. Estimación de la pérdida potencial del suelo A

Con el producto de los mapas individuales de los Factores R, K, LS, C y P se estimó la pérdida potencial del suelo para la hoya de la Ciudad de Loja (Figura 8), lo cual permitió determinar las zonas más vulnerables (Figura 10). Respecto a la erosión potencial del suelo (Figura 8) los resultados indicaron valores entre 0 a 6,488.44 t/ha al año. Los valores más altos

fueron encontrados en la parte noreste y sur de la hoya de la Ciudad de Loja, así como en las partes altas de la colina occidental y dentro de las cuencas de los ríos secundarias o quebradas en la colina oriental, donde las intervenciones antropogénicas son recientes o fuertes (deforestación → tierras agropecuarias; Figura 8). Los valores mínimos respecto a la erosión potencial se encuentran en las partes altas de la colina oriental y en la parte sur de la colina occidental, donde bosque nativo y vegetación natural protege los suelos de la erosión. Además, en áreas pobladas, o donde existe infraestructura, la erosión de suelos es despreciable, ya que las construcciones sellan el suelo y evitan su pérdida. Valores moderados se ilustran en áreas con plantaciones forestales, donde la cobertura es irregular, como también en la parte alta de sureste de la hoya, donde P_e es máximo y la inclinación del terreno fuerte, aunque existe vegetación natural (bosque nativo y paramo).

Figura 8

Erosión potencial del suelo A



Según la clasificación de Ozsoy y Aksoy (2015; Tabla 6) la hoya de la Ciudad de Loja presenta una vulnerabilidad a la erosión baja en un 47% (12,860 ha) del área total, moderada en un 23% (6,287 ha), alta en un 8% (2,092 ha), muy alta en un 8% (2,329 ha) y extremo en un 14% (3,700 ha) (Figura 9). Observando el mapa generado respecto a la vulnerabilidad de los suelos para la hoya de la Ciudad de Loja (Figura 10) es evidente que las zonas más vulnerables (muy alta y extremo) se encuentran particularmente en el norte y en el sur, donde la intervención antropogénica es fuerte (agropecuaria, plantaciones forestales, etc.) y donde existen terrenos inclinados (pendientes fuertes). Además, en las cuencas de los ríos secundarios o quebradas la vulnerabilidad es extremo, debido a la deforestación progresivo en estas áreas. Donde existe vegetación natural (bosque nativo y paramo) los suelos están protegidos de la erosión, aunque Pe puede ser alto en estas áreas, lo que implica que una cobertura vegetal sana y completa evita la erosión de los suelos. En zonas pobladas y de infraestructura la vulnerabilidad de los suelos es mínimo también, ya que los suelos están sellados por construcciones humanas.

Figura 9

Grados de erosión para la Hoya de la Ciudad de Loja

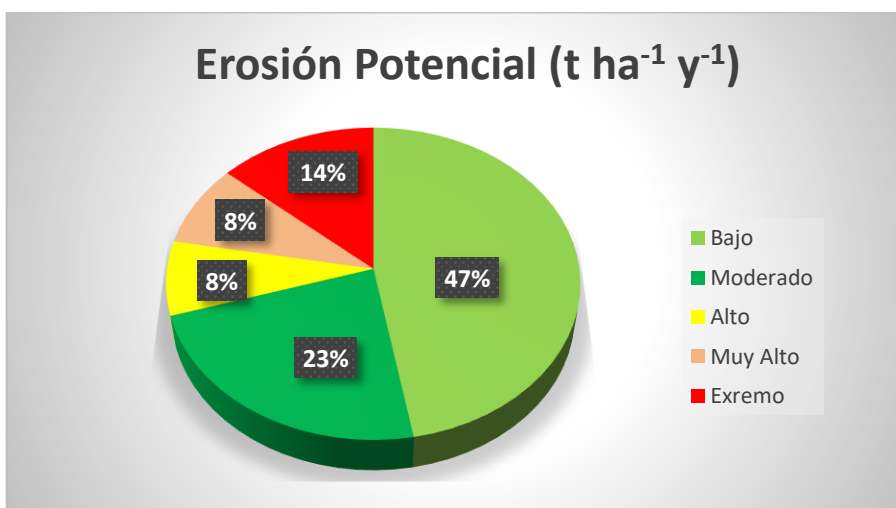
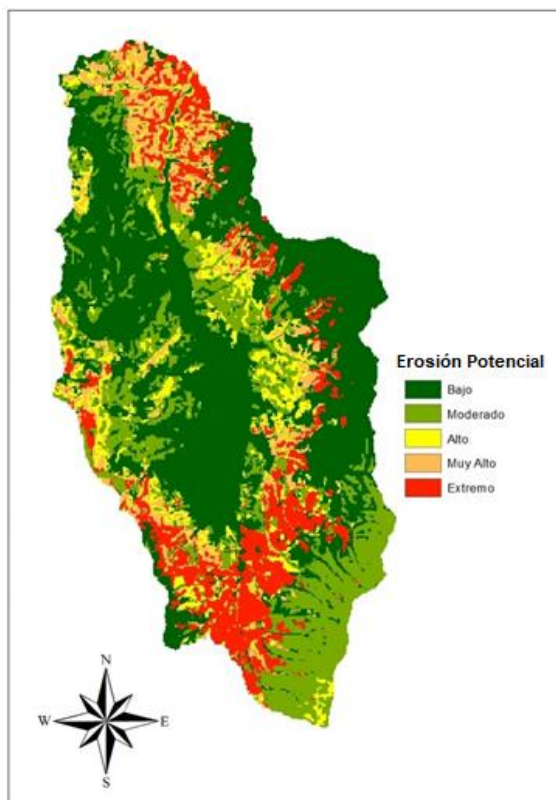


Figura 10.

Mapa de vulnerabilidad del suelo ante la erosión



Conclusiones

La información disponible para estimar la erosión potencial de suelos en la hoya de la Ciudad de Loja fue suficiente para generar mapas en alta resolución (50 x 50m), aunque, específicamente la información respecto a los tipos de suelo (textura y MO) y de la cobertura fueron muy generales y a veces incompletos. Respecto al Factor R, lo cual es generalmente calificado como factor más importante para la erosión potencial de suelos en combinación con el Factor LS (Ochoa-Cueva et al., 2015), tiene una influencia secundaria en el área de estudio, aunque valores hasta $11,742.80 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ fueron calculados. Esto se debe a la cobertura que puede proteger el suelo de los impactos de las gotas de lluvia, lo cual es evidente en sureste de la hoya donde la vegetación natural (bosque natural y paramo) que precave la pérdida excesiva de suelos. En consecuencia, el Factor C es el más importante para evitar o disminuir la pérdida de suelos en la hoya de la Ciudad de Loja, particularmente la vegetación natural. Sin embargo, grandes áreas ya están deforestadas en la hoya debido al crecimiento de la Ciudad y la implementación de tierras agropecuarias, que aumenta el riesgo a la erosión y desastres naturales (derrumbes e inundaciones), debido a que el cambio del uso de suelo aumenta la escorrentía (Arteaga et al., 2020).

Como ilustró este análisis, en el área de estudio el potencial de la erosión de suelos es más preocupante en zonas ocupadas con tierras agropecuarias y de plantaciones forestales (generalmente pino y eucalipto), particularmente en el noreste y el sur de la hoya, pero también dentro de las cuencas de los ríos secundarios o quebradas, donde valores hasta $6,286 \text{ t/ha}$ al año fueron calculados. No existen prácticas de conservación de los suelos en la hoya de la Ciudad de Loja, lo cual no solo provoca la pérdida excesiva del suelo en áreas de intervención humana, sino también lleva a pérdidas de fertilidad del suelo, por lo que nuevas áreas para la agricultura deben ser buscados constantemente que acelera la deforestación.

Recomendaciones

Para mejorar el análisis de la erosión potencial en la hoya de la Ciudad de Loja es importante actualizar y completar la información respecto a los tipos de suelo (textura, MO, permeabilidad, etc.), así como respecto a la cobertura, ya que, debido al crecimiento de la zona urbana y las intervenciones antropogénicas en sus alrededores, el uso de suelo cambia constantemente. Además, para contar con información climática espaciotemporal más detallada (factor R), se debe instalar estaciones meteorológicas adicionales, especialmente en la parte norte y sur de la hoya donde la vulnerabilidad de los suelos respecto a la erosión es extrema. Esto también ayudará al gobierno local para implementar un sistema de alerta temprana respecto a desastres naturales, como deslizamientos e inundaciones, las cuales son más frecuentes durante los últimos años debido al impacto ambiental antropogénico y el cambio climático.

Para reducir la vulnerabilidad de los suelos respecto a la erosión y disminuir el riesgo respecto a desastres naturales, se recomienda extender el territorio de las áreas protegidas e implementar planes de reforestación, particularmente en las áreas más afectadas y en las partes altas e inclinadas, donde las precipitaciones son generalmente más intensas. Esto no solo protege al suelo de la erosión, sino también aumenta la capacidad de los suelos para retener agua, que garantiza el suministro de agua potable para la población y provee suficiente agua para la agricultura. Respecto a las tierras agropecuarias alrededor de la Ciudad, se debe implementar prácticas de conservación para proteger el suelo contra la erosión y para conservar su fertilidad. Estas prácticas, como la siembra contra pendiente, la siembra de barreras vivas (hileras) o cultivos en terrazas, deben ser implementadas especialmente en áreas donde las pendientes son pronunciadas y la cobertura vegetal es escasa. Además, para retener el agua y disminuir la escorrentía se debe construir zanjas de infiltración que permiten la acumulación de agua lluvia que permite que se infiltre en el suelo. Todo esto debe ser incluido en un plan de desarrollo para la Ciudad de Loja, que garantiza el manejo sostenible de los recursos naturales y fortalece el bienestar de la población, particularmente en vista del cambio climático actual.

REFERENCIAS

- Álvarez-Figueroa, Pablo & Magno, Tamayo-Malacatus. (2016). *Modeling of water erosion in Zapotillo and Pindal cantons at the province of Loja using GIS*. In: XXI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador. DOI: 10.13140/RG.2.2.16841.13921.
- Arnoldus HMJ. 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin* 34:39–51.
- Arteaga, J., Ochoa, P., Fries, A., & Boll, J. (2020). Identification of Priority Areas for Integrated Management of Semiarid Watersheds in the Ecuadorian Andes. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56(2), 270-282.
- Bendix, J., Trachte, K., Palacios, E., Rollenbeck, R., Göttlicher, D., Nauss, T., & Bendix, A. (2011). El Niño meets la Niña—anomalous rainfall patterns in the "traditional" el Niño region of southern Ecuador. *Erdkunde*, 151-167.
- Bendix, J., Fries, A., Zárate J., Trachte, K., Rollenbeck, R., Pucha-Cofrep, F., Paladines, R., Palacios, I., Orellana, J., Oñate-Valdivieso, F., Naranjo, C., Mendoza, L., Mejía, D., Guallpa, M., Gordillo, F., González-Jaramillo, V., Dobbermann, M., Célleri, R., Carrillo, C., Araque, A. and Achilles, S. (2017): RadarNet-Sur First Weather Radar Network in Tropical High Mountains. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 1235–1254, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00178.1>.
- Chamba-Ontaneda, M., Massa-Sánchez, P., & Fries, A. (2019). Presión demográfica sobre el agua: un análisis regional para Ecuador. *Revista Geográfica Venezolana*, 60(2), 360-378.
- Consortio formado por la Fundación para la Investigación del Clima Universidad Técnica Particular de Loja y LAVOLA S. A. (2019). *Índice de Vulnerabilidad al Cambio Climático en la Ciudad de Loja (Provincia de Loja) en Ecuador*. CAF-Banco de Desarrollo de América Latina

- Encina Rojas Arnulfo e Ibarra José (2003). La degradación del suelo y sus efectos sobre la población. *Población y Desarrollo. Dialnet* 14(25), 5–10.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5654360>
- ESRI, 2012. ArcGIS Desktop: Release 10.1. Environmental Systems Research Institute, Redlands.
- Food and Agriculture Organization. 2019. *SOIL EROSION the greatest challenge for sustainable soil management*. United Nations Food and Agriculture Organization.
<http://www.fao.org/3/ca4395en/ca4395en.pdf>
- Fries, A., Rollenbeck, R., Bayer, F., González-Jaramillo, V., Oñate-Valdivieso, F., Thorsten, P., & Bendix, J. (2014). Catchment precipitation processes in the San Francisco valley in southern Ecuador: combined approach using high-resolution radar images and in situ observations. *Meteorology and Atmospheric Physics* 126,13–29.
<https://doi.org/10.1007/s00703-014-0335-3>
- Fries, A., Silva, K., Pucha-Cofrep, F., Oñate-Valdivieso, F., & Ochoa-Cueva, P. (2020). Water Balance and Soil Moisture Deficit of different Vegetation Units under Semiarid Conditions in the Andes of Southern Ecuador. *Climate* 8 (2), 30. <https://doi.org/10.3390/cli8020030>.
- García-Cueto, O. R., Santillán-Soto, N., López-Velázquez, E., Reyes-López, J., Cruz-Sotelo, S., & Ojeda-Benítez, S. (2018). Trends of climate change indices in some Mexican cities from 1980 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1–2), 775–790.
<https://doi.org/10.1007/s00704-018-2620-4>
- Golden Software (2012), Surfer Version 11: Reference Manual. Golden Software, Inc., Golden, Colorado, U.S.A.
- González-Jaramillo, V., Fries, A., Rollenbeck, R., Paladines, J., Oñate-Valdivieso, F. and Bendix, J. (2016). Assessment of deforestation during the last decades in Ecuador using

NOAA-AVHRR satellite data. *Erdkunde* 70 (3), 217-235.

DOI:10.3112/erdkunde.2016.03.02

INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2007. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.
<http://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas>

IPCC. (2020). Summary for Policymakers. In: P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.), United Kingdom and New York: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge.

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*.

Ministerio del Ambiente del Ecuador [MAE] (2013). *Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental*. Subsecretaría de Patrimonio Natural, Quito.

MAE. (2015). **Plan Nacional de Cambio Climático**. Retrieved from Ecuador:
<https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/EQU/PLAN%20NACIONAL%20DE%0CAMBIO%20CLIM%3%81TICO.pdf>

MAE. (2017). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático*. Retrieved from Ecuador:
<http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/TERCERA-COMUNICACION-BAJA-septiembre-20171-ilovepdfcompressed1.pdf>

- MAE. (2018). *Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra*. Disponible en: <https://sni.gob.ec/mapa-cobertura-uso>
- Mejía-Veintimilla, D., Ochoa-Cueva, P., Samaniego-Rojas, N., Félix, R., Arteaga, J., Crespo, P., & Fries, A. (2019). River discharge simulation in the high andes of southern Ecuador using high-resolution radar observations and meteorological station data. *Remote Sensing*, 11(23), 2804.
- Mitasova H, Hofierka J, Zlocha M, Iverson LR. 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems* 10: 629–641.
- Mogrovejo, F., Benítez, S., & Segarra, G. (2018). Actuaciones urbanas en la periferia de la ciudad de Loja. Caso de estudio: borde suroriental Zamora Huayco. *Eídos*, 11, 1–18. <https://doi.org/10.29019/EIDOS.V0111.416>
- NASA LP DAAC (2013). NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Version 3.0 (SRTM Plus) Product Release. Land Process Distributed Active Archive Center, National Aeronautics and Space Administration.
- Nearing MA. 1997. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. *Soil Science Society of America Journal* 61:917–919.
- Ochoa-Cueva, P., A. Fries, P. Montesinos, J.A. Rodríguez-Díaz, and J. Boll. (2015). Spatial Estimation of Soil Erosion Risk by Land-cover Change in the Andes OF Southern Ecuador. *Land Degradation & Development* 26 (6): 565–73. <https://doi.org/10.1002/ldr.2219>.
- ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS (OEA). 1994. *Plan integral de desarrollo de los recursos hídricos de la provincia de Loja*. Washington D.C., 1994. <https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea02s/ch15.htm>

- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (ONU). 2014. Decenio internacional para la acción “El agua fuente de vida” 2005 – 2015. Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH). Disponible en: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm>.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (ONU). 2020. Educación – Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/>
- Oñate-Valdivieso F., Fries A., Mendoza K., Gonzalez-Jaramillo V., Pucha-Cofrep F., Rollenbeck R. and Bendix J. (2018): Temporal and spatial analysis of precipitation patterns in an andean region of southern Ecuador using LAWR weather radar. *Meteorol Atmos Phys* 130 (4), pp. 473-484 DOI: 10.1007/s00703-017-0535-8
- Ovalles Ureña, P. J. (2013). Análisis comparativo de la pérdida de suelo de la Cuenca Alta de la Presa de Sabana Yegua, usando sistema de información geográfica (SIG) y métodos directos (Bachelor's thesis, Quito: USFQ, 2013).
- Ozsoy, Go khan & Aksoy, Erugu. (2015). Prediction of soil loss differences and sediment accumulation at the Nilofer creek watershed, Turkey, using multiyear satellite data in a GIS. *Guacarito International*. 30. 843-857. 10.1080/10106049.2014.997307.
- PNUMA, Municipalidad de Loja & Naturaleza y Cultura Internacional. (2007). Perspectivas del Medio Ambiente Urbano GEO Loja: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Municipalidad de Loja y Naturaleza y Cultura Internacional.
- Ramon, C. y Reyes A. (2005). *Determinación del grado de erosión actual y potencial de los suelos del cantón Catamayo* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Loja.
- Renard KG, Freimund JR. 1994. *Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE*. *Journal of Hydrology* 157: 287–306.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. y Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil*

- Loss Equation*. Agricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook No. 703. US Department of Agriculture: Washington, DC.
- Rodríguez Procel, W. I. (2020). *Cálculo de índices de cambio climático en base a datos diarios de temperatura y precipitación para la región costa en el sur del Ecuador* / [Universidad Técnica Particular de Loja]. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/26144>
- Rollenbeck R, Bendix J (2011) Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. *Atmos Res* 99:277–289
- Saborío, J. (2002). Informe final: Estudio erosión potencial, cuenca del río Savegre, Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad, Costa Rica, 41.
- Samaniego-Rojas, N., Eguiguren, P., Maita, J., & Aguirre, N. (2015). Clima de la región Sur el Ecuador: historia y tendencias. N. Aguirre, T. Ojeda, P. Eguiguren, Z. Aguirre. (Eds.), *Cambio climático y Biodiversidad: Estudio de caso de los páramos del Parque Nacional Podocarpus*, 43-62.
- Secretaría Nacional del Agua [SENAGUA] (2011). *Caracterización conceptual y metodológica enfocado al ordenamiento territorial como parte del Plan Nacional de Recursos Hídricos.*, edited by Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).
- SIGTIERRAS, Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (2018). *Mapa de Órdenes de Suelos del Ecuador*. <http://www.sigtierras.gob.ec/descargas/>
- Soil Survey Staff, 2006. Keys to Soil Taxonomy. 10th ed. US Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- SRTM; Consortium for Spatial Information [CGIAR-CSI], 2018. CGIAR-CSI. (2018). CGIAR-CSI SRTM 90m DEM Digital Elevation Database. In <https://cg iarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>

- Uddin K, Murthy MSR, Wahid SM, Matin MA (2016) Estimation of Soil Erosion Dynamics in the Koshi Basin Using GIS and Remote Sensing to Assess Priority Areas for Conservation. *PLoS ONE* 11 (3): e0150494. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150494>
- USDA. (United States Department of Agriculture). 2004. Economic Research Service. International Agricultural Productivity Data Set, available on the USDA Economic Research Service International Agricultural Productivity dataset web page.
- Vanacker V, von Blanckenburg F, Govers G, Molina A, Poesen J, Deckers J. (2007). Restoring dense vegetation can slow mountain erosion to near natural benchmark levels. *Geology* 35, 303–306.
- VILLACÍS B. y D. CARRILLO. 2012. “País atrevido: la nueva cara sociodemográfica del Ecuador”. Revista AnalítiKa (Edición Especial). Quito, Ecuador.
- Vuille, M., Bradley, R.S., Keimig, F., 2000. Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate* 13, 2520–2535.
- Wang, Ranghu & Zhang, Shuwen & Yang, Jiuchun & Pu, Luoman & Yang, Chaobin & Lingxue, yu & Chang, Liping & Bu, Kun. (2016). Integrated Use of GCM, RS, and GIS for the Assessment of Hillslope and Gully Erosion in the Mushi River Sub-Catchment, Northeast China. *Sustainability*. 8. 317. 10.3390/su8040317.
- WISCHMEIER, W. H., y SMITH, D. D., 1978: *Predicting rainfall erosion*. 10JieJ. USDA Agr. Res. Servo Hand-book, 537.