

# Estimación de volúmenes de sedimentos por erosión hídrica empleando el modelo RUSLE en cuencas de la provincia de Manabí, Ecuador

Gema Casanova-Ruiz <sup>1</sup>, Daniel Delgado <sup>2,3\*</sup>, Ramona Panchana <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Maestría en Ingeniería Civil, Mención Vialidad, Facultad de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Avenida José María Urbina, Portoviejo EC130105, Manabí, Ecuador.

<sup>2</sup>Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Avenida José María Urbina, Portoviejo EC130105, Manabí, Ecuador.

<sup>3</sup>Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens, Université de Perpignan, Via Domitia, UMR 5110, 52 Avenue Paul Alduy, 66860, Perpignan CEDEX, France.

**Resumen:** La producción de sedimentos por erosión hídrica es un tema de gran interés debido a que su desconocimiento puede representar graves peligros para las comunidades e infraestructuras cercanas. En los últimos años se han desarrollado varios métodos para cuantificar los sedimentos, pero su complejidad, precisión y exactitud varía dependiendo del enfoque empleado. Sin embargo, muchos de estos modelos requieren de la utilización de extensas series temporales de precipitaciones, pero, en Ecuador, las estaciones meteorológicas presentan una preocupante carencia de datos y su distribución espacial no es homogénea, lo que genera una incorrecta estimación de las lluvias en el territorio analizado. Para resolver este problema, es posible utilizar metodologías que empleen información ráster satelital. El objetivo de la presente investigación fue estimar los volúmenes de sedimentos en las cuencas hidrográficas de la provincia de Manabí, mediante la implementación del modelo RUSLE, a través de un procedimiento empírico que requiere de la utilización de la densidad aparente del suelo en sus tres texturas principales (arena, arcilla y limo). La metodología consideró la delimitación de las cuencas analizadas, la evaluación de datos ráster satelitales para determinar los seis parámetros del modelo RUSLE entre el año 2001 y 2020 y la estimación de la densidad aparente mediante un método innovador. La delimitación de las cuencas fue obtenida de fuentes regionales; la información satelital fue obtenida desde fuentes web oficiales; los valores típicos de la densidad aparente fueron obtenidos de fuentes a escala mundial; y la validación de los datos de densidad aparente se realizó mediante un muestreo en sitio. Los resultados permitieron identificar tasas de erosión del suelo que varían entre 0,10 ton ha<sup>-1</sup> y 3252,22 ton ha<sup>-1</sup>, lo que generó una estimación de sedimentos entre 0,06 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> y 692,43 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> a nivel de píxel. La densidad aparente promedio fue de 1,49 ton m<sup>-3</sup>, lo que demuestra un elevado contenido de arena en las cuencas manabitas. La validación de datos reveló una excelente compatibilidad entre la metodología propuesta y el análisis convencional en sitio, que se ve reflejada en una diferencia promedio inferior al 3%. La información obtenida permitirá a las entidades gubernamentales competentes, establecer programas de mitigación para hacer frente a la pérdida del suelo por erosión hídrica y al control de la producción de sedimentos.

**Palabras clave:** erosión del suelo, RUSLE, volúmenes de sedimentos, teledetección, Manabí.

## Estimation of sediment volumes due to rainfall erosion using RUSLE model in basins of the province of Manabí, Ecuador

**Abstract:** Sediment production due to rainfall erosion is a topic of great interest because its lack of knowledge can represent serious dangers for nearby communities and infrastructures. Several methods have been developed in

**To cite this article:** Casanova-Ruiz, G., Delgado, D., Panchana, R. 2024. Estimation of sediment volumes due to rainfall erosion using RUSLE model in basins of the province of Manabí, Ecuador. *Revista de Teledetección*, 63, 1-21. <https://doi.org/10.4995/raet.2024.20147>

\* Corresponding author: [daniel.delgado@utm.edu.ec](mailto:daniel.delgado@utm.edu.ec)

recent years to quantify sediments, but their complexity, precision, and accuracy vary depending on the approach used. However, many of these models require the use of extensive precipitation time series, but in Ecuador, the meteorological stations present a worrying lack of data and their spatial distribution is not homogeneous, which generates an incorrect rainfall estimation in the analyzed territory. To solve this problem, it is possible to implement methodologies that use satellite raster information. The objective of the present investigation was to estimate the volumes of sediments in the hydrographic basins of the province of Manabí, through the implementation of the RUSLE model and an empirical procedure that requires the use of the apparent density of the soil in its three main textures (sand, clay and silt). The methodology considered the delimitation of the analyzed basins, the evaluation of satellite raster data to determine the six parameters of the RUSLE model between 2001 and 2020, and the estimation of apparent density through an innovative method. The delimitation of the basins was obtained through regional sources; the satellite information was obtained from official web sources; the typical values of the apparent density were obtained from sources at global scale; and the validation of the apparent density data was carried out by means of on-site sampling. The results allowed identifying soil erosion rates that vary between  $0.10 \text{ ton ha}^{-1}$  and  $3252.22 \text{ ton ha}^{-1}$ , which generated an estimate of sediments between  $0.06 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$  and  $692.43 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$  at the pixel level. The average apparent density was  $1.49 \text{ ton m}^{-3}$ , which demonstrates a high sand content in the basins of Manabí. The data validation revealed an excellent compatibility between the proposed methodology and the conventional on-site analysis, which is reflected in an average difference of less than 3%. The information obtained will allow the competent government entities to establish mitigation programs to deal with the loss of soil due to rainfall erosion and to control the sediments production.

**Key words:** soil erosion, RUSLE, sediment volumes, remote sensing, Manabí.

---

## 1. Introducción

La erosión del suelo es considerada un grave problema ambiental que afecta a todas las regiones del planeta y que se mantiene en aumento a un ritmo alarmante (Ahmed *et al.*, 2023). Este problema ambiental puede reducir el rendimiento de los cultivos hasta en un 50%, por lo que representa una de las principales amenazas para la seguridad alimentaria mundial (Sparovek y Schnug, 2001). Según Keesstra *et al.* (2016), para el 2050 se habrá deteriorado más del 90% del suelo del planeta debido a problemas de erosión hídrica. La pérdida del suelo por erosión hídrica es uno de los principales generadores de sedimentos (Delgado *et al.*, 2022), lo que puede afectar a comunidades e infraestructuras cercanas. Esto ha despertado el interés por cuantificar el volumen de sedimentos, lo que se ha visto reflejado en un crecimiento considerable de sus investigaciones en los últimos 30 años (Gallart *et al.*, 2013). No obstante, en Ecuador, las estimaciones de tasas de erosión y la cuantificación de sedimentos son poco abordadas. La falta de estudios en este campo de investigación limita a las autoridades tomar medidas adecuadas para mitigar los problemas ambientales asociados a estos procesos ambientales. Problemas como los ocurridos en el Río Coca por su proceso de erosión constante, que ha generado la destrucción de

poblados, vías y la modificación considerable del paisaje (Sarmiento *et al.*, 2021), es un ejemplo de las tantas catástrofes ambientales registradas en Ecuador y que pudieron evitarse contando con un estudio adecuado.

El Ecuador continental está conformado de tres regiones (Costa, Sierra y Oriente) en las cuales se experimentan climas y condiciones ambientales muy diferentes, que son asociados a la existencia de dos trópicos, la línea equinoccial y la Cordillera de Los Andes (Pourrut, 1994). La provincia de Manabí forma parte de la región Costa, la cual se caracteriza por poseer dos estaciones climáticas bien diferenciadas: la estación húmeda (de diciembre a mayo) y la estación seca (de junio a noviembre) (Delgado *et al.*, 2022).

Existen muchos modelos que permiten cuantificar el volumen de sedimentos (Gartner *et al.*, 2014; Ramos-Diez *et al.*, 2017), pero generalmente requieren de extensas series de precipitaciones y de alta resolución temporal o, la utilización de instrumentos de medición ubicados en cuerpos de agua (He *et al.*, 2023). Esto último restringe el análisis a sedimentos en suspensión. En Ecuador, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), entidad a cargo de registrar las precipitaciones a escala nacional, ofrece una base de

datos incompleta e irregular, debido a una inadecuada metodología de registro y a una distribución espacial no homogénea de las estaciones de aforo, lo que genera una estimación no representativa de las precipitaciones (Erazo *et al.*, 2018; Delgado *et al.*, 2022) y restringe la utilización de los modelos convencionales para estimar los volúmenes de sedimentos.

La Ecuación Universal de Pérdida del Suelo Revisada (RUSLE en inglés) es uno de los modelos empíricos más utilizados a nivel mundial para estimar las tasas de erosión del suelo (Renard *et al.*, 1997; Panagos *et al.*, 2015; Räsänen *et al.*, 2023). Este modelo ha sido ampliamente validado, mostrando una precisión elevada en estudios a diferentes escalas espaciales y temporales (Polykretis *et al.*, 2020). Para calcularlo se requieren determinar seis factores: 1) el Factor R (factor desencadenante de la erosión hídrica, denominado erosividad de la lluvia); 2) Factor K (erodabilidad del suelo); 3 y 4) Factor LS (factor topográfico que resulta de la combinación de la longitud de la pendiente -L- y la gradiente de la pendiente -S-); 5) Factor C (uso y cobertura del suelo) y, por último; 6) Factor P (prácticas de conservación del suelo).

La erosividad de la lluvia, generada por la energía de cada gota de agua al momento de entrar en contacto con la superficie de la tierra, provoca que las partículas del suelo se separen cuando su fuerza de impacto es superior a la fuerza de cohesión del suelo (Delgado *et al.*, 2022). Estas partículas sueltas son arrastradas por la escorrentía superficial y son conducidas hasta los cuerpos de agua, donde son desplazados como sedimentos (Scott y Williams, 1978). El modelo RUSLE por sí solo no permite estimar los volúmenes de sedimentos obtenidos dentro de una cuenca hídrica, pero gracias a los avances tecnológicos y a procedimientos empíricos, es posible su modificación y utilización.

Para calcular los factores de RUSLE es necesario disponer con información detallada obtenida en campo dentro de la zona analizada, mediante un estudio prolongado en parcelas condicionadas, que demandan de mucho tiempo y recursos (Delgado *et al.*, 2022). Sin embargo, existen métodos alternativos que permiten estimar estos factores empleando bases de datos satelitales obtenidas de sensores remotos (Delgado *et al.*, 2021b; Delgado *et al.*, 2023).

El objetivo principal de la presente investigación es estimar los volúmenes de sedimentos en las cuencas hidrográficas de la provincia de Manabí, mediante la implementación del modelo RUSLE combinado con un procedimiento empírico que requiere de la utilización de la densidad aparente del suelo en sus tres texturas principales: arena, limo y arcilla.

Entre las principales novedades del trabajo está la posibilidad de convertir las tasas de erosión ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) a volúmenes de sedimentos ( $m^3$ ) a escala de pixel, sin la necesidad de restringirse a un cuerpo hidrológico o a una unidad de división política.

## 2. Metodología

### 2.1. Área de estudio

La provincia de Manabí tiene una extensión de 18958  $km^2$  y se ubica entre las coordenadas 609028 O – 10039658 S y 560199 O – 9787108 S, dentro de la región costa del Ecuador (Figura 1). Su capital es la ciudad de Portoviejo. Limita al norte con la provincia de Esmeraldas, al este con las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas y Los Ríos, al Sur con las provincias de Santa Elena y Guayas y al oeste con el Océano Pacífico.

La cartografía de la provincia de Manabí (límites políticos) fue obtenida del Instituto Geográfico Militar del Ecuador (<https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/>) en formato shapefiles para posteriormente adaptarlo al sistema de coordenadas WGS84 zona UTM 17 S bajo los softwares R y Qgis.

Una vez limitada la provincia, se procedió a identificar las cuencas hidrográficas para el objeto de estudio. Como condicionante, se seleccionaron todas las cuencas que tengan áreas mayores a 500  $km^2$  y que se encuentren completamente dentro de esta división política. Para esto, se consideraron las características ambientales de las cuencas obtenidas por Delgado *et al.* (2021b) (Figura 1 y Tabla 1).

Mediante la condición de las áreas habilitantes para la selección de las cuencas de estudio, se incluyeron 8021  $km^2$  de la provincia de Manabí, que corresponde al 42% de su extensión total.

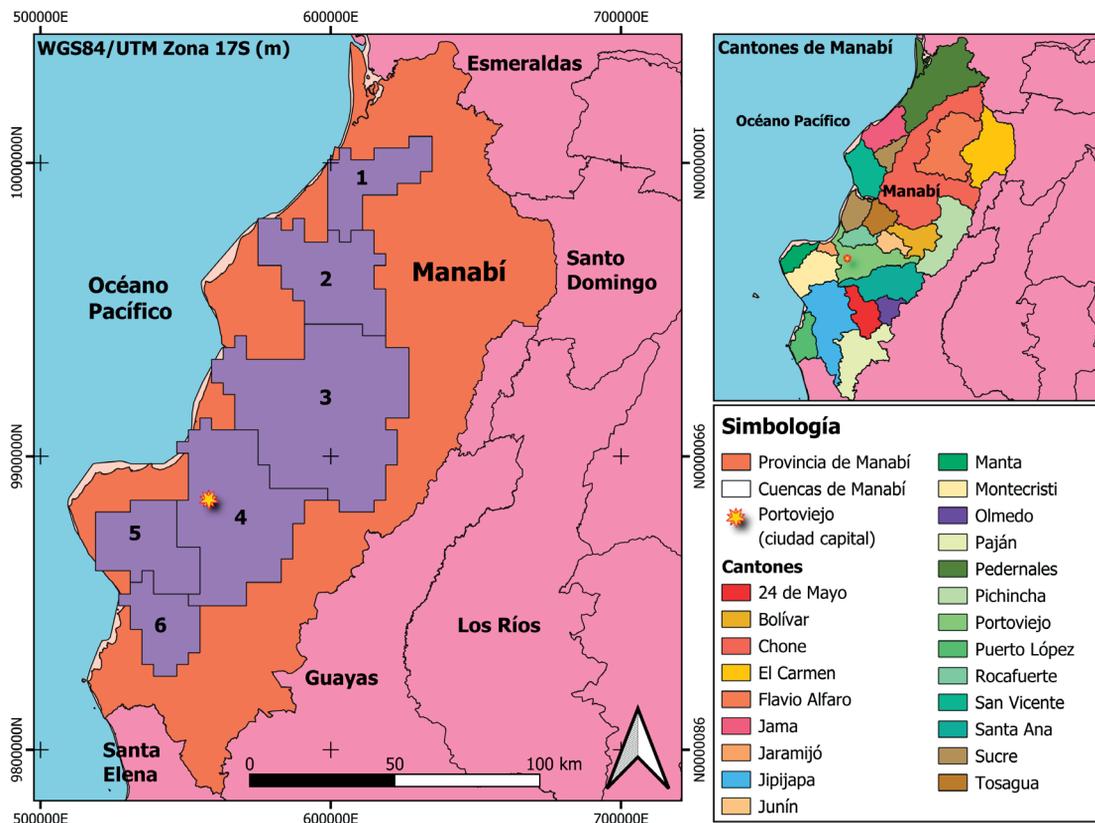


Figura 1. Ubicación de las cuencas de la provincia de Manabí con áreas superiores a 500 km<sup>2</sup>.

## 2.2. Recopilación de bases de datos

### 2.2.1. Precipitaciones: GPM-IMERG

Global Precipitation Measurement (GPM) es un sistema de satélites que están a cargo de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y la Agencia Japonesa de

Exploración Aeroespacial (JAXA) que recopilan información de precipitaciones a nivel mundial. GPM-IMERG (recuperaciones integradas de múltiples satélites de GPM) corresponde al producto combinado de una cadena de procesamiento que se focaliza en la intercalibración, interpolación y fusión de los datos de precipitaciones obtenidos de microondas satelitales. Esta información es combinada con satélites infrarrojos para generar un ráster de precipitación homogénea en casi todo el mundo y de manera gratuita. Los resultados están disponibles desde junio del 2000 hasta la actualidad en varias resoluciones temporales (30 min, 3 horas, 1 día y 1 mes) y una resolución espacial de 10 km (Huffman *et al.*, 2019).

Tabla 1. Características ambientales de las cuencas de la provincia de Manabí (Delgado *et al.*, 2021b).

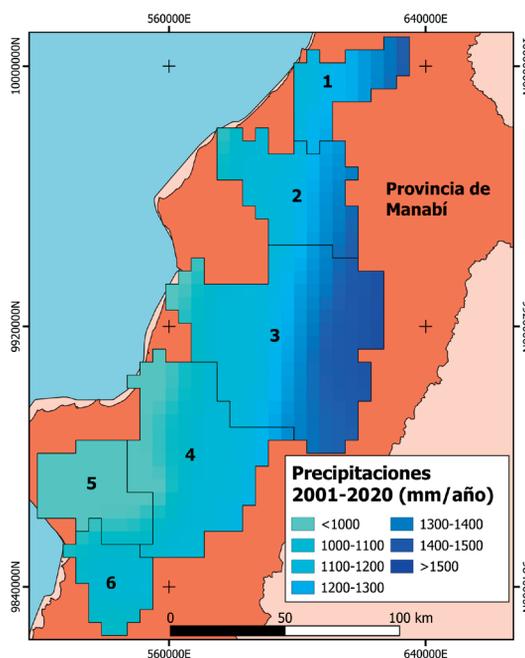
ID	Nombre	Área (km <sup>2</sup> )	Pendiente (°)	Elevación (m)
1	Coaque	656	1,3	247
2	Jama	1137	1,3	238
3	Chone	2898	1,3	160
4	Portoviejo	1905	1,4	194
5	Caña	833	1,4	222
6	Ayampe	592	2	360
TOTAL		8021		

Dentro de su amplia gama de información destacan tres tipos de productos: IMERG *Early Run* (latencia mínima de 4 horas, representación de precipitaciones casi a tiempo real con poca calibración); IMERG *Late Run* (latencia mínima de 12 horas, representación de precipitaciones

en tiempo cuasi-lagrangiana, calibración media); IMERG *Final Run* (lanzada 3,5 meses después, datos con alta calidad y calibración profunda).

La presente investigación utilizó la base de datos GPM-IMERG *Final Run*, descargando la variable “precipitationCal” en mm hora<sup>-1</sup>. Los datos iniciales se obtuvieron en formato NetCDF a una escala temporal de 30 min para el área de la provincia de Manabí (<https://gpm.nasa.gov/>). El rango de descarga se realizó desde el 01-01-2001 (00 h:00 m) hasta el 31-12-2020 (23 h:30 m). Cada día contiene 48 capas (1 capa por cada media hora), obteniendo un total de 349152 capas que posteriormente fueron apiladas para obtener un ráster promedio de precipitaciones entre el 2001 y 2020.

El procesamiento de la información (modificación a sistema de coordenadas WGS84 zona UTM 17 S, escalado espacial a 100 m, obtención de un ráster promedio) se realizó bajo el software R, convirtiéndolas al formato clásico *Tag Image File Format* (.tif). El mapa de precipitaciones puede observarse en la Figura 2.



**Figura 2.** Distribución espacial de las precipitaciones durante el período 2001-2020 en las cuencas manabitas.

### 2.2.2. Características del suelo: SoilGRIDS

Las características del suelo se obtuvieron a nivel de pixel mediante la base de datos SoilGRIDS (<https://soilgrids.org/>). La información disponible contiene más de 230 000 observaciones de perfiles de suelo a nivel mundial, junto con otras observaciones del clima, cobertura terrestre, y morfología del suelo, entre otras.

La resolución es de 250 m. Para la presente investigación se consideraron parámetros físicos (arena, arcilla, limo) y químicos (contenido de carbono orgánico) para la descarga (Figura 3 y

Tabla 2), que corresponden a la capa superficial del suelo (Delgado *et al.*, 2023).

La información ráster fue procesada mediante R y QGIS para adaptar el sistema de coordenadas y la escala espacial a las condiciones de la presente investigación (WGS84 zona UTM 17 S y 100 m de resolución espacial).

### 2.2.3. Topografía: SRTM

La *Misión de topografía de radar del transbordador* (SRTM en inglés) es una base de datos satelital que contiene información de la superficie

**Tabla 2.** Distribución promedio de las propiedades del suelo en las cuencas manabitas (g kg<sup>-1</sup> y %).

ID	Nombre	Propiedades del suelo (g kg <sup>-1</sup> )				Propiedades del suelo (%)			
		Arena	Arcilla	Limo	Carbono orgánico	Arena	Arcilla	Limo	Carbono orgánico
1	Coaque	345,5	312,2	340,3	50,0	33,0	29,8	32,5	4,8
2	Jama	369,7	307,1	308,8	45,5	35,9	29,8	30,0	4,4
3	Chone	318,1	263,7	276,0	40,6	35,4	29,4	30,7	4,5
4	Portoviejo	384,8	288,4	286,6	40,6	38,5	28,8	28,7	4,1
5	Caña	471,7	260,8	255,0	39,9	45,9	25,4	24,8	3,9
6	Ayampe	412,1	285,1	282,2	36,3	40,6	28,1	27,8	3,6

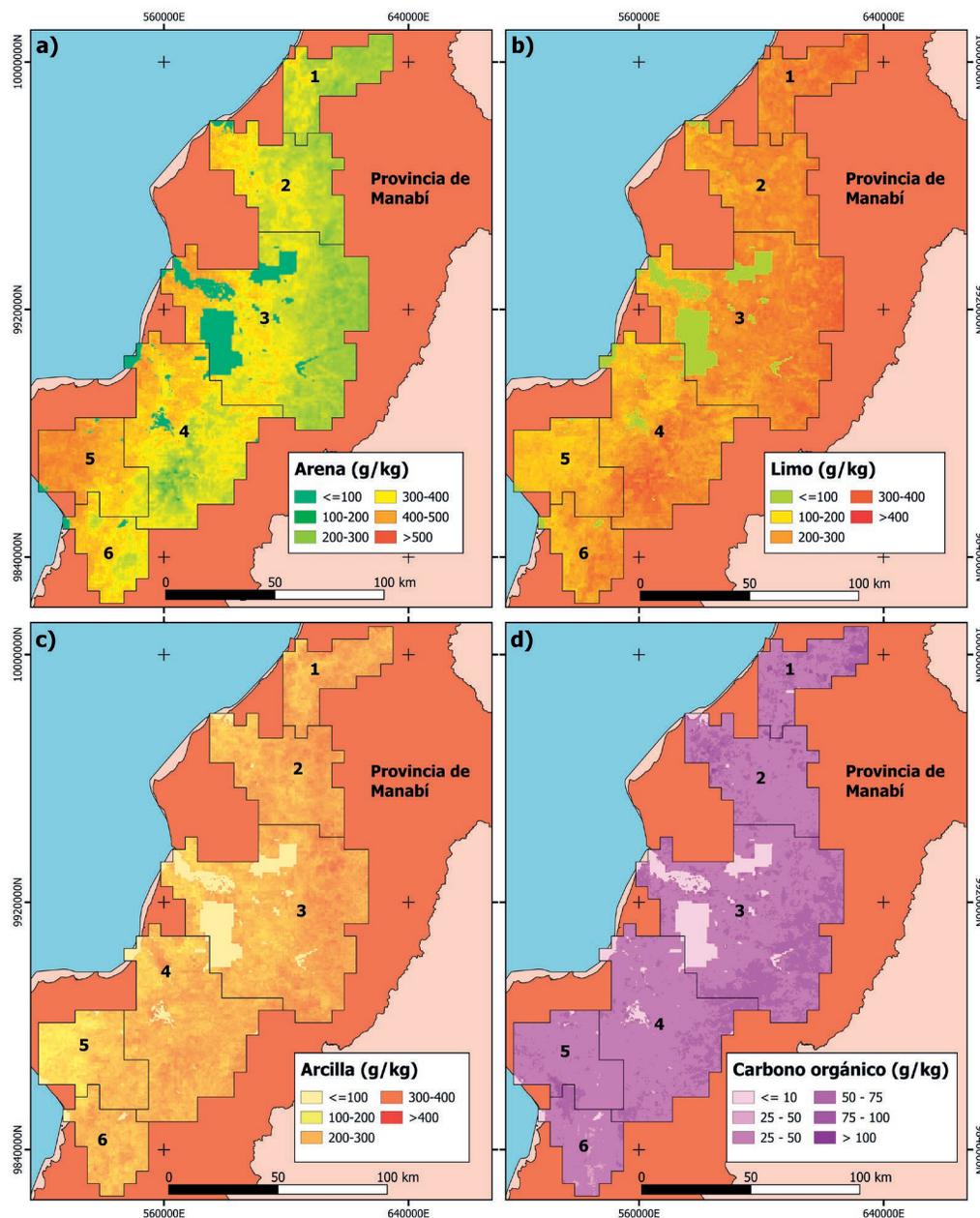


Figura 3. Contenido de arena (a), limo (b), arcilla (c) y carbono orgánico (d) en las cuencas manabitas en  $g\ kg^{-1}$ .

de la tierra, describiendo su topografía (elevación y pendiente) y otras características ambientales a una escala de 90 m. El sistema de coordenadas, resolución espacial y el llenado de sumideros fueron realizados mediante R y QGIS para cumplir con las condiciones de la investigación. La representación del Modelo Digital de Elevación (MDE) se observa en la Figura 4.

#### 2.2.4. NDVI de MODIS

El *Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada* (MODIS en inglés) es una base de datos satelital que proporciona información derivada de la vegetación, cobertura del suelo, fluorescencia de los océanos, nubes, aerosoles, e incendios, entre otros.

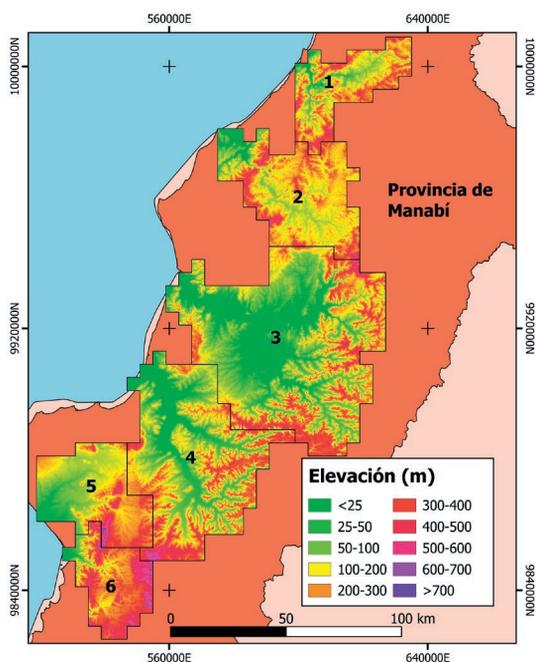


Figura 4. Distribución espacial de las elevaciones en las cuencas de la provincia de Manabí.

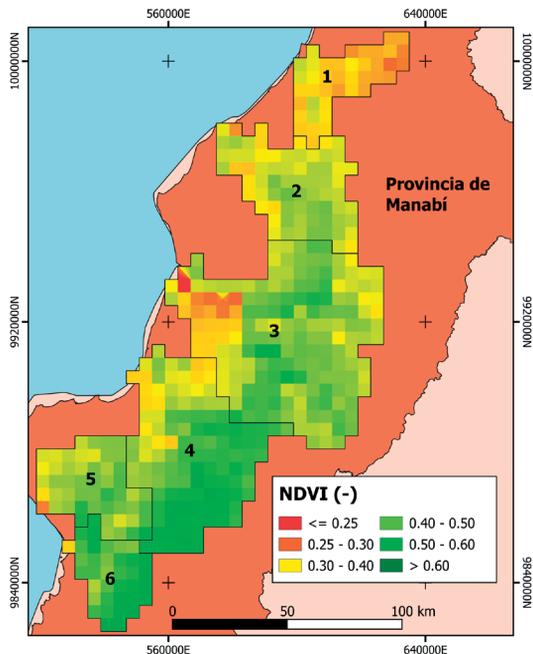


Figura 5. Distribución espacial del NDVI (adimensional) en las cuencas de la provincia de Manabí.

Entre esta amplia gama de servicios que ofrece, MODIS cuenta con el Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada (NDVI) que permite caracterizar la vitalidad de la vegetación para posteriormente aplicarlo al cálculo del Factor C de RUSLE.

Para la presente investigación, se utilizó la versión “Vegetation Indices 16-Day” en su resolución de 1 km, para posteriormente transformarla a las condiciones del trabajo. Después de haber convertido el sistema de coordenadas y la resolución espacial, se procedió a aplicar un factor de conversión de 0,0001 para llevar las magnitudes al rango normal del NDVI que oscila entre -1 y 1 (Kamel *et al.*, 2015) (Figura 5).

## 2.3. Aplicación del modelo RUSLE

RUSLE es un modelo matemático ampliamente utilizado para estimar la erosión del suelo considerando seis factores condicionantes (Ecuación 1, Renard *et al.*, 1997).

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

Aquí, las tasas de erosión (Tabla 3) fueron representadas mediante  $A$  ( $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ), la cual está conformada por la erosividad de la lluvia ( $R$ ,  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{año}^{-1}$ ), la erodabilidad del suelo ( $K$ ,  $\text{ton MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ), el factor de longitud y pendiente ( $L$  y  $S$ , adimensionales), el uso y cobertura del suelo ( $C$ , adimensional) y las prácticas de conservación ( $P$ , adimensional). Debido a la inexistencia de prácticas de conservación dentro de la provincia de Manabí (Pacheco *et al.*, 2019), el factor  $P$  fue representado con la unidad (1, adimensional).

### 2.3.1. Erosividad de la lluvia (Factor R)

Para calcular el Factor R se considerará la metodología propuesta por Delgado *et al.* (2022), la cual está desarrollada especialmente para las condiciones particulares del territorio ecuatoriano. Para el caso de la provincia de Manabí, territorio que forma parte de las aguas que drenan hacia el Océano Pacífico, la ecuación a considerar fue la siguiente (Ecuación 2):

$$R=187,94x^2+0,36x+156,73 \quad (2)$$

Donde R representa a la erosividad de la lluvia en MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y x representa las precipitaciones (en este caso, corresponderá a la precipitación promedio entre el 2001 y 2020).

Cabe destacar que la Ecuación 2 está validada por métricas estadísticas muy consistentes (R<sup>2</sup>= 0,99 y p-value=99,99%) e investigaciones regionales (Mendoza et al., 2023).

### 2.3.2. Erodabilidad del suelo (Factor K)

El Factor K calcula la resistencia del suelo frente a la fuerza erosiva de la lluvia y a la energía de escorrentía (Delgado et al., 2023).

La información necesaria para calcular el presente factor fue obtenida de SoilGRIDS (sección 2.2.2) mediante la aplicación de la siguiente ecuación (Ecuación 3, Williams 1995; Neitsh et al., 2000):

$$K=f_{sand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand} \quad (3)$$

Donde K es la erodabilidad del suelo adaptada para el enfoque USLE (versión original),  $f_{sand}$  es un factor que depende del contenido de arena,  $f_{cl-si}$  depende del contenido de arcilla y limo,  $f_{orgc}$  está condicionado por el contenido de carbono orgánico y  $f_{hisand}$  corresponde a los contenidos elevados (extremos) de arena.

Se debe considerar que esta ecuación fue originalmente propuesta para el modelo USLE. Para aplicarlo en RUSLE, basta con convertir los resultados al Sistema Internacional de unidades, aplicando un factor de conversión de 0,1317 (Ecuación 4) (Al Rammahi y Khassaf 2018; Delgado et al., 2023).

$$K_{RUSLE}=K \times 0,1317 \quad (4)$$

Aquí, el  $K_{RUSLE}$  corresponde a la erodabilidad del suelo y está adaptado al modelo aplicado a la presente investigación y se representa en ton MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. Los elementos complementarios de la Ecuación 3 se muestran a continuación (Ecuaciones 5, 6, 7 y 8):

$$f_{sand} = \left\{ 0,2 + 0,3 \times \exp \left[ -0,256 \times m_s \times \left( 1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3} \quad (6)$$

$$f_{orgc} = \left\{ 1 - \frac{0,25 \times orgC}{orgC + \exp(3,75 - 2,95 \times orgC)} \right\} \quad (7)$$

$$f_{hisand} = \left\{ 1 - \frac{0,7 \times \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[ -5,51 + 22,9 \times \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right\} \quad (8)$$

Donde  $m_s$  es el porcentaje del contenido de arena,  $m_{silt}$  es el porcentaje de contenido de limo,  $m_c$  es el porcentaje de contenido de arcilla y  $orgC$  es el porcentaje de contenido de carbono orgánico. Para convertir estos valores a porcentaje, fue necesario convertir todas las unidades de las propiedades del suelo a g kg<sup>-1</sup> y posteriormente determinar el porcentaje de representación de cada uno de estos cuatro parámetros en cada píxel (Delgado et al., 2023).

### 2.3.3. Longitud y pendiente (Factor LS) y uso y cobertura del suelo (Factor C)

Para el factor LS se emplearon los resultados obtenidos de la base de datos SRTM (sección 2.2.3). Se usó la metodología automatizada del Sistema para Análisis Geocientíficos Automatizados (SAGA en inglés, disponible en QGIS) empleando el algoritmo de Desmet y Govers (1996) a un archivo MDE corregido por el comando *Fill sink* de SAGA.

El Factor C fue obtenido considerando el NDVI de MODIS (sección 2.2.4) mediante la ecuación de Knijff et al. (1999) (Ecuación 9):

$$C = \exp \left[ -\alpha \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)} \right] \quad (9)$$

Aquí  $\alpha$  se consideró con un valor de 2 y  $\beta$  con 1 de acuerdo con las estimaciones de Knijff et al. (1999) que se adaptan a un modelo espacial a escala de píxel.

## 2.4. Estimación de volúmenes de sedimentos

El modelo RUSLE se ha caracterizado por generar excelentes estimaciones de tasas de erosión a escala mundial. Sin embargo, su utilización en la estimación de volúmenes de sedimentos es limitada. Para estimar este complemento es necesario considerar la densidad aparente de los sedimentos. La densidad aparente corresponde a la relación existente entre la masa del suelo secado al horno y el volumen global, considerando además el volumen de las partículas y el vacío poroso entre estas (USDA, 1999).

Si no se dispone de datos de densidad aparente para la zona analizada, se pueden obtener

valores aproximados conociendo la composición del suelo en base a sus propiedades (arcilla, limo y arena) mediante valores típicos de alta veracidad (Tabla 4).

Una vez conocidas las densidades aparentes de las propiedades físicas del suelo (arcilla, limo, arena) se procedió a considerar la metodología aplicada en la sección 2.3.2 para establecer la composición de cada píxel en cuanto al porcentaje de cada propiedad y aplicar la siguiente ecuación (Ecuación 10):

$$V_{sed} = \frac{RUSLE}{Dap} \quad (10)$$

Donde  $V_{sed}$  corresponde al volumen de sedimentos en  $m^3 \text{ año}^{-1}$ ,  $RUSLE$  representa las tasas de erosión de suelos en  $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $Dap$  es la densidad aparente promedio del suelo en  $\text{ton m}^{-3}$ . Se debe considerar que los resultados se mostrarán a escala de píxel. El resumen metodológico puede observarse en la Figura 6.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Análisis de los factores de RUSLE

La Figura 7a representa la erosividad de la lluvia. Este factor está condicionado por la distribución

espacio-temporal de las precipitaciones (Figura 2), que evidencia una tendencia creciente de las lluvias desde el suroeste al noroeste de las cuencas manabitas. La precipitación media anual osciló entre  $890,78 \text{ mm año}^{-1}$  hasta  $1561,62 \text{ mm año}^{-1}$  y generó rangos de erosividad de  $796,41 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$  y  $1697,19 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . La cuenca Caña (Id 5 en Figura 2 y Tabla 3) es la que experimenta la precipitación media más baja ( $980,26 \text{ mm año}^{-1}$ ), mientras que la cuenca Chone (Id 3 en Figura 2 y Tabla 3) registró la precipitación media mayor ( $1308,94 \text{ mm año}^{-1}$ ). Dado que el Factor R depende directamente de la cantidad de lluvia registrada, las cuencas con mayor precipitación anual promedio registraron también los valores más altos de la erosividad de la lluvia. La cuenca Chone (Id 3 en Figura 7 y Tabla 3) registró  $1395 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$  de erosividad de lluvia, seguida por la cuenca Coaque (Id 1 en Figura 7 y Tabla 3) con  $1307,22 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .

Con respecto al Factor K (Figura 7), que representa la erodabilidad del suelo y que está condicionada por su composición física y química (Figura 7 y Tabla 2), se puede observar que, en promedio, las cuencas manabitas están compuestas principalmente por arena (38,20%), limo (29,07%), arcilla (28,53%) y carbono

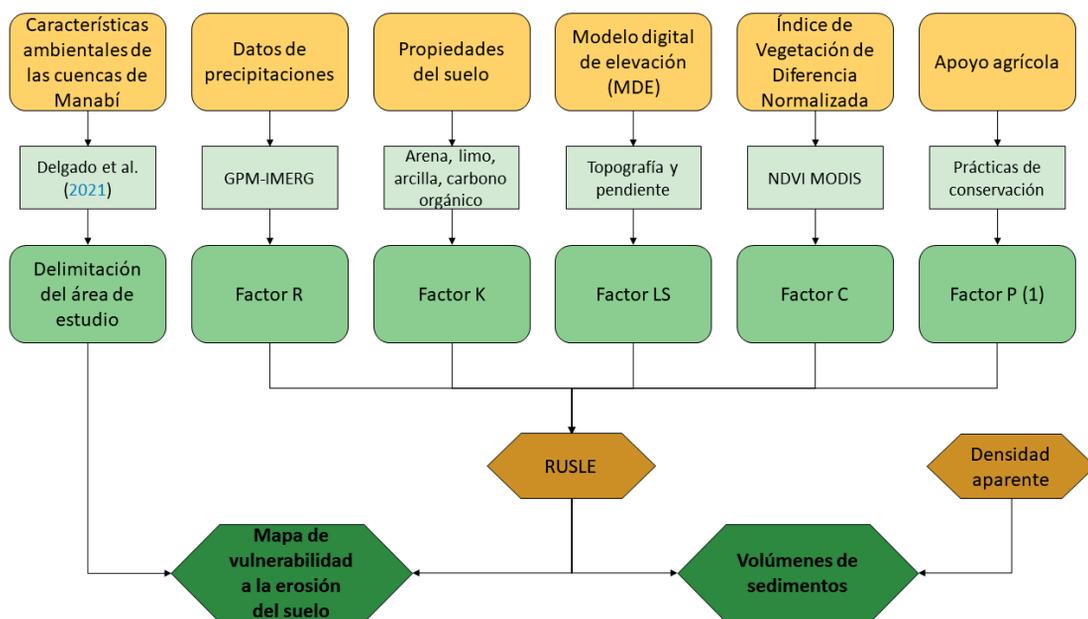


Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

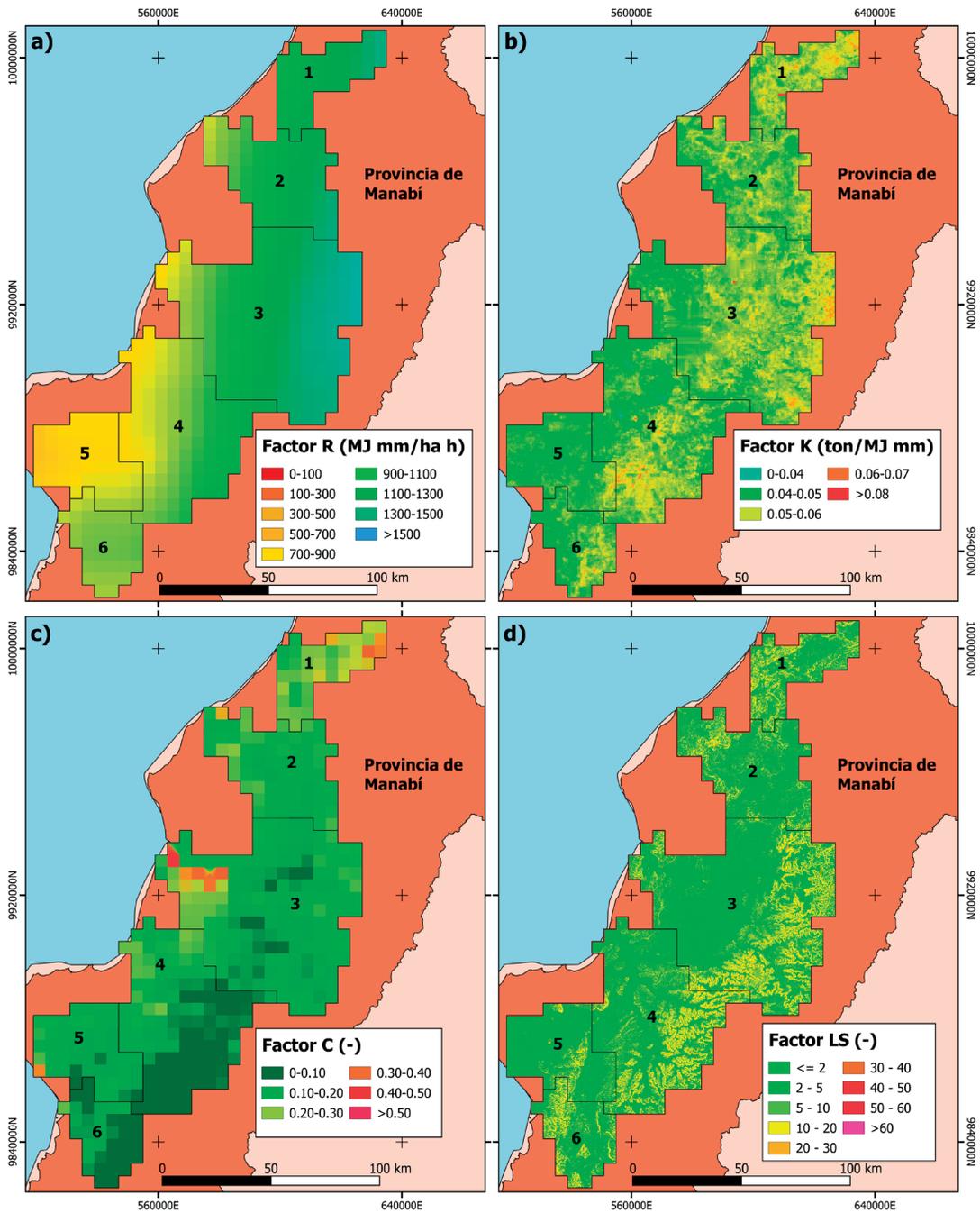


Figura 7. Valores de los factores de RUSLE en las cuencas Manabitas.

orgánico (4,20%), respectivamente. Los resultados del Factor  $K$  oscilaron entre  $0,05 \text{ ton MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  y  $0,06 \text{ ton MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  (en promedio), lo que demuestra una composición bastante regular entre las cuencas analizadas. Sin embargo, es importante destacar que los valores más bajos de la

erodabilidad del suelo se generaron en las cuencas que presentaron menor contenido de limo y mayor contenido de arcilla, situación que corrobora lo demostrado por Delgado *et al.* (2023) a escala nacional en Ecuador.

**Tabla 3.** Valores promedio de las tasas de erosión y factores del modelo RUSLE para las cuencas Manabitas.

ID	Nombre	RUSLE (ton ha <sup>-1</sup> )	Factor R (MJ mm ha <sup>1</sup> h <sup>-1</sup> )	Factor K (ton MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )	Factor C (-)	Factor LS (-)	Precipitaciones (mm)
1	Coaque	170,55	1307,22	0,06	0,3	7,77	1301,03
2	Jama	84,92	1225,77	0,06	0,22	5,64	1239,91
3	Chone	83,39	1324,99	0,06	0,19	5,69	1308,94
4	Portoviejo	43,65	1032,15	0,05	0,15	5,97	1092,42
5	Caña	27,19	895,81	0,05	0,18	3,56	980,26
6	Ayampe	40,17	999,24	0,05	0,11	6,88	1067,29

Para el Factor C (Figura 7c), el mapa de NDVI (Figura 5) representó la distribución espacial de la vegetación considerando su vitalidad. Los valores del NDVI oscilaron entre 0,24 y 0,62 dentro del territorio analizado. Los valores más altos del NDVI se registraron en la cuenca Ayampe (Id 6 en Figura 5 y Tabla 3) mientras que los valores más bajos se registraron en las cuencas Chone y Coaque (Id 3 y 1 en Figura 5 y Tabla 3, respectivamente). Considerando las características del NDVI, los valores más altos representan mejores condiciones en la vitalidad de la vegetación, mientras que los valores más bajos representan una menor vitalidad. Para el análisis del Factor C, las consideraciones de las magnitudes son inversas. Valores más bajos del Factor C representan un factor de manejo de cobertura mucho mejor (más favorable), lo que daría como resultado tasas de erosión más bajas (tomando en cuenta al Factor C como un factor condicionante independiente). En promedio, los valores del uso y cobertura del suelo de las seis cuencas analizadas son aceptables, porque su rango se registró entre 0,11 (Ayampe, Id 6 en Figura 7d y Tabla 3) y 0,30 (Coaque, Id 1 en Figura 7d y Tabla 3), lo que demostraría un buen comportamiento ante un eventual proceso erosivo considerando este factor. A escala de píxel, los sectores con valores del uso y cobertura del suelo más bajos se registraron en la región sur de las cuencas Portoviejo y Ayampe (0,04 es el valor del píxel más bajo en ambas cuencas).

El Factor LS (Figura 7d) fue calculado en base a un MDE de SRTM y empleando un algoritmo automatizado de SAGA. El MDE analizado registró elevaciones desde los 0 m (al ser cuencas costeras, parte de su territorio se encuentra

al mismo nivel del mar) hasta los 755 m (que representan a pequeños sectores montañosos de la costa, Delgado *et al.*, 2022) (Figura 4). Este rango de elevaciones generó que los valores de LS tuvieran una variabilidad entre 0,03 y 111,82. Cabe destacar que valores de LS superiores a 100 pueden ser alarmantes en el momento de generar las tasas de erosión mediante el modelo RUSLE. Sin embargo, un análisis más profundo demuestra que el rango consolidado de valores de LS se concentra entre 0 y 25 (lo que se refleja en un LS promedio de 5,78), por lo que valores superiores al rango anterior son muy poco frecuentes y menos representativos. La cuenca que registró los valores más altos de LS fue Coaque (Id 1 en Figura 7d y Tabla 3) con 7,77, mientras que la cuenca con menor LS fue Caña (Id 5 en Figura 7d y Tabla 3).

El Factor P no fue considerado dentro de la generación de mapas temáticos de los factores RUSLE, debido a la inexistencia de prácticas de conservación dentro de la provincia de Manabí (Pacheco *et al.*, 2019) y, en general, en todo el Ecuador (Delgado *et al.*, 2022). Por este motivo, el Factor P fue considerado como 1 para todo el territorio analizado.

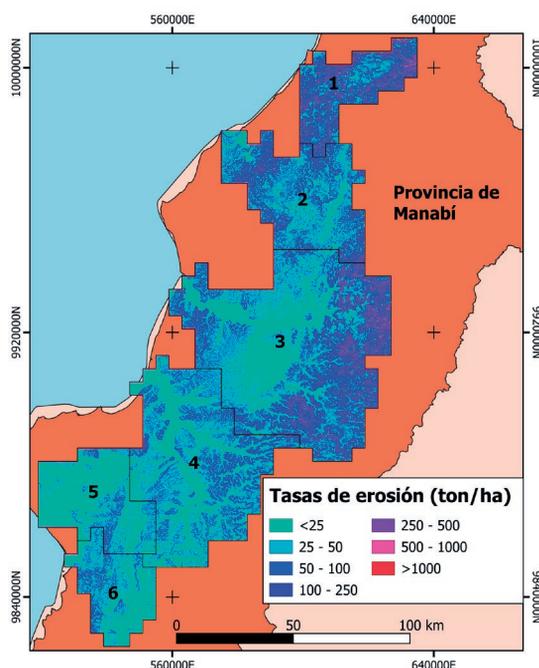
### 3.2. Análisis de las tasas de erosión (RUSLE)

Manabí es una provincia de Ecuador que se caracteriza por tener un clima tropical y por estar en contacto con el Océano Pacífico. Esto permite que su entorno geográfico sea muy interesante y que predominen elevaciones promedio de 200 m, a diferencia de la región Sierra del Ecuador donde se registran elevaciones promedio superiores

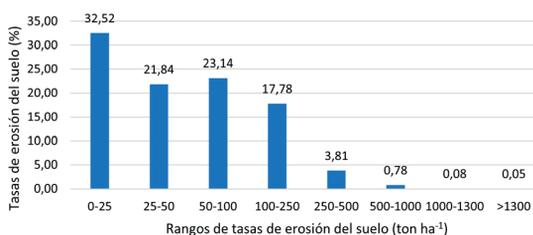
a los 2000 m (Delgado *et al.*, 2021b). El área de estudio, que se clasificó en seis cuencas que presentaron áreas superiores a 500 km<sup>2</sup>, sufre una cantidad considerable de pérdida de suelo cada año. Para abordar este tema crítico (especialmente por su falta de análisis en todo el Ecuador) y muy relevante, la presente investigación cuantificó la pérdida anual del suelo aplicando el modelo RUSLE, mediante la combinación de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos de teledetección, permitiendo superar los problemas relacionados a la escasez de información, como, por ejemplo, la falta de una base de datos de precipitación sólida (Delgado *et al.*, 2022). El presente análisis reveló que las tasas de erosión oscilaron entre 0,10 ton ha<sup>-1</sup> y 3252,22 ton ha<sup>-1</sup>, con un valor promedio de 75,6 ton ha<sup>-1</sup> (Figura 8). Se debe tener en cuenta que el valor máximo de la erosión del suelo es producto de los valores máximos del Factor LS (especialmente) y que no estarían representando correctamente la realidad de la zona de estudio, lo que puede palpase con el valor medio de las tasas de erosión. En este caso, de los 717,027 píxeles analizados, que conforman la zona de estudio, un solo píxel registró la tasa de erosión máxima, mientras que la mayor cantidad de datos se registraron entre 0 ton ha<sup>-1</sup> y 250 ton ha<sup>-1</sup> (95,27%, Figura 9). Este análisis permite suponer que los valores superiores a 1000 ton ha<sup>-1</sup> (0,14%, Figura 9) son resultados sesgados que no representan la realidad de la zona de estudio, producto de una observación anormal y extrema en la serie temporal de datos analizados y que puede afectar potencialmente a la estimación real.

Un análisis por cuencas reveló que Coaque (Id 1 en Figura 8 y Tabla 3) es la que mayores problemas de erosión registró, con un valor promedio de 170,55 ton ha<sup>-1</sup>, mientras que la cuenca Caña (Id 5 en Figura 8 y Tabla 3) registró los valores más bajos de la erosión del suelo en el territorio manabita, con 27,19 ton ha<sup>-1</sup>. Los valores más altos de la erosión del suelo registrados en Coaque (Id 1 en Figura 8 y Tabla 3) son producto de la combinación de un Factor LS y C más altos (7,77 y 0,3, respectivamente), junto con un Factor R elevado (1307,22 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>). En cuando a la cuenca Caña (Id 5 en Figura 8 y Tabla 3), los valores bajos también se asocian a registros bajos de los Factores LS, C y R (en orden de importancia, respectivamente). Esto permitiría tener una idea

del orden de importancia de los factores RUSLE dentro de las cuencas manabitas y que concuerda con lo mencionado por Borelli *et al.*, (2017), donde sitúa al Factor LS como el más importante dentro del análisis de las tasas de erosión de suelo.



**Figura 8.** Distribución de las tasas de erosión en las cuencas Manabitas.



**Figura 9.** Distribución de las tasas de erosión del suelo por rangos dentro de las cuencas Manabitas.

### 3.3. Variabilidad espacial de las tasas de erosión y tipos de cobertura del suelo

Para poder analizar las tasas de erosión considerando los tipos de cobertura del suelo, se empleó la clasificación MODIS *Land Cover* (Cover y

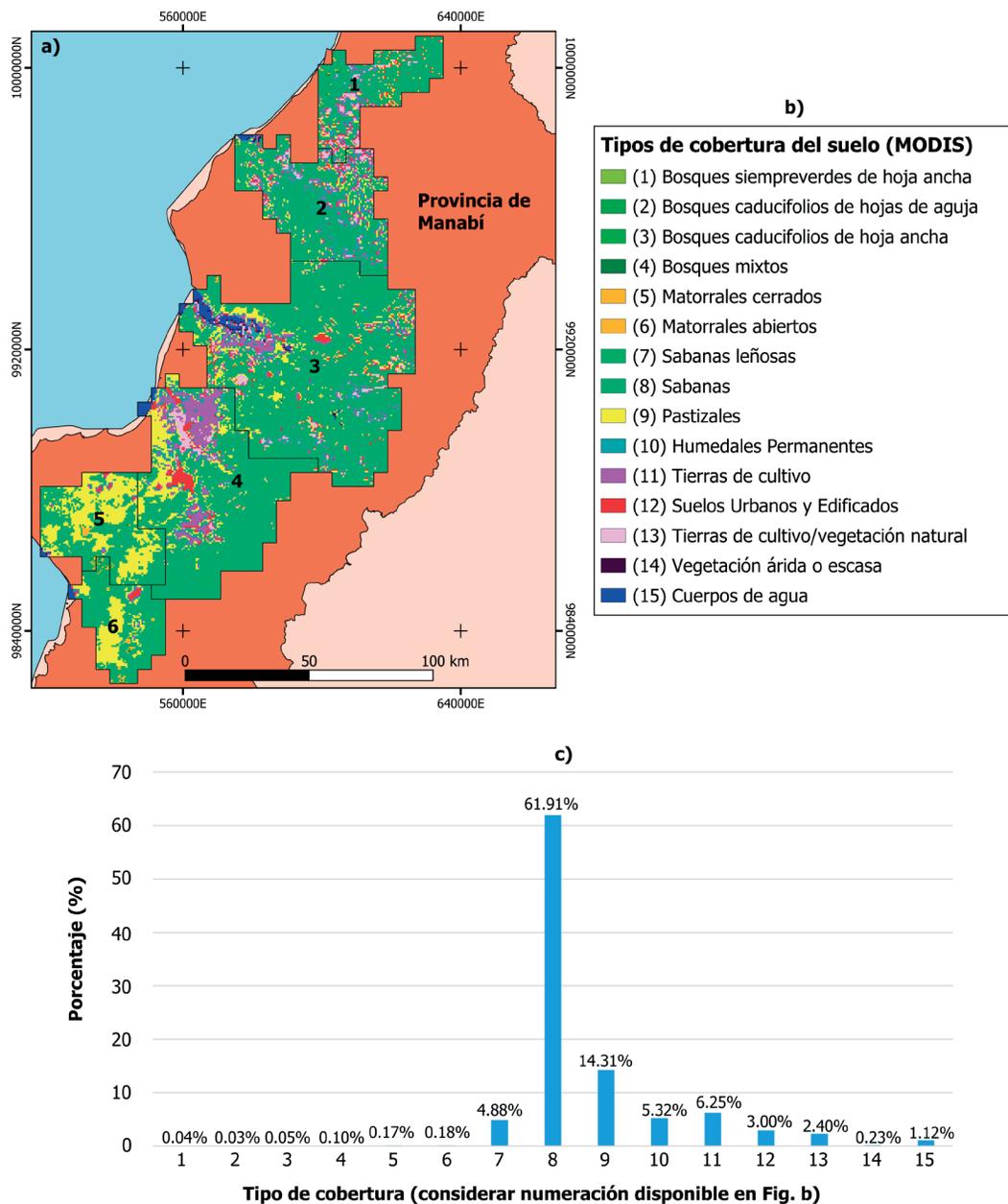


Figura 10. Clasificación de la cobertura del suelo (a y b) y su distribución porcentual (c) en las cuencas manabitas.

Change, 1999) que distribuye la superficie del suelo en 17 clases de cobertura según su composición y características. Se identificaron 15 clases en la provincia de Manabí debido a que los tipos “Hielo y nieve” y “Bosques siempre verdes de hojas de aguja” no están presentes en la zona de estudio, producto de sus características ambientales (Figura 10).

Dentro de las cuencas de la provincia de Manabí predomina el tipo de cobertura Sabanas con el 61,91% de la superficie analizada (Figura 10c). Este tipo de cobertura supone una protección media-baja ante una eventual erosión del suelo (Delgado *et al.*, 2022). El segundo tipo de cobertura predominante es Pastizales con el 14,31% del territorio estudiado, que también represente a una

protección media-baja ante los procesos erosivos generados por la lluvia (Delgado *et al.*, 2022).

Debido a que varios tipos de cobertura registran condiciones similares, se realizó una reclasificación de los 15 tipos de suelos encontrados en las cuencas manabitas (los cuerpos de agua no fueron considerados debido a que no forman parte de tierras con vegetación). Para esto se consideraron tres grupos principales:

- Bosques (grupo 1): Bosques siempreverdes de hoja ancha, Bosques caducifolios de hojas de aguja, Bosques caducifolios de hoja ancha, Bosques mixtos.
- Sabanas (grupo 2): Matorrales cerrados, Matorrales abiertos, Sabanas leñosas, Sabanas, Pastizales, Humedales Permanentes, Vegetación árida o escasa
- Tierras de cultivo/Suelo urbano: Tierras de cultivo, Suelos Urbanos y Edificados, Mosaico de tierras de cultivo/vegetación natural.

Mediante esta reclasificación, el grupo 2 (Sabanas, Figura 11a) representó el 87,01% del territorio analizado, seguido del grupo 3 (Tierras de cultivo/ Suelo urbano, 12,78%) y grupo 1 (bosques, 0,22%).

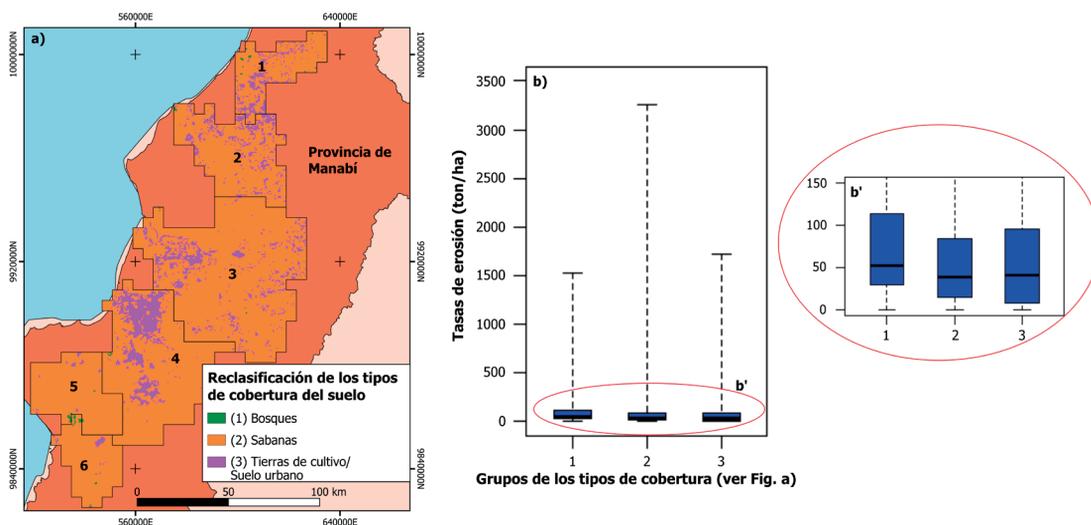
El diagrama de caja y bigotes (Figura 11b) permitió demostrar que el grupo Sabanas es el que registró los valores más altos de las tasas de erosión y, por ende, donde se incluyen los valores atípicos de la

erosión del suelo (sección 3.2). Sin embargo, al analizar con mayor detalle los cuartiles del diagrama de bigotes (Figura 11b') se puede observar que las tasas consolidadas de erosión del suelo más altas (cuartil 3) se registran en el tipo de cobertura Bosques, un bioma que es considerado "protector" ante los procesos erosivos (Delgado *et al.*, 2021b). Aquí los valores superan las 100 ton ha<sup>-1</sup>. Esto se debe a que en estos sectores (al oeste de la ID 4 y sur de la ID 5, Figura 11a) se registran valores elevados del Factor LS debido a la presencia de montañas costeras. En este grupo también se registró la mediana más alta (51 ton ha<sup>-1</sup>).

En general, tanto los cuartiles como las medianas se encuentran en rangos similares de las tasas de erosión, lo que demuestra que la erosión del suelo en las cuencas manabitas no está principalmente condicionada por la cobertura del suelo, y que sus valores se distribuyen con similitud entre los tres grupos analizados. Esto también permite demostrar que el Factor más importante en la generación de las tasas de erosión en la zona de estudio corresponde al LS.

### 3.4. Estimación de las tasas de sedimentos empleando las tasas de erosión (RUSLE)

El modelo RUSLE no ha sido considerado como un modelo de partida predilecto para estimar



**Figura 11.** Reclasificación de la cobertura del suelo (a) en las cuencas manabitas. El diagrama de bigotes muestra las magnitudes de las tasas de erosión que cada grupo representa (b). b' es el acercamiento del diagrama de bigotes.

las tasas de sedimentos, pese a ser un enfoque ampliamente utilizado para el cálculo de tasas de erosión en muchas investigaciones a escala mundial debido a su alta confiabilidad (Tian *et al.*, 2021; Masroor *et al.*, 2022; Valeriu, 2023). Esto permite plantearse la posibilidad de aprovechar las bondades de las estimaciones de RUSLE para la cuantificación de las tasas de sedimentos.

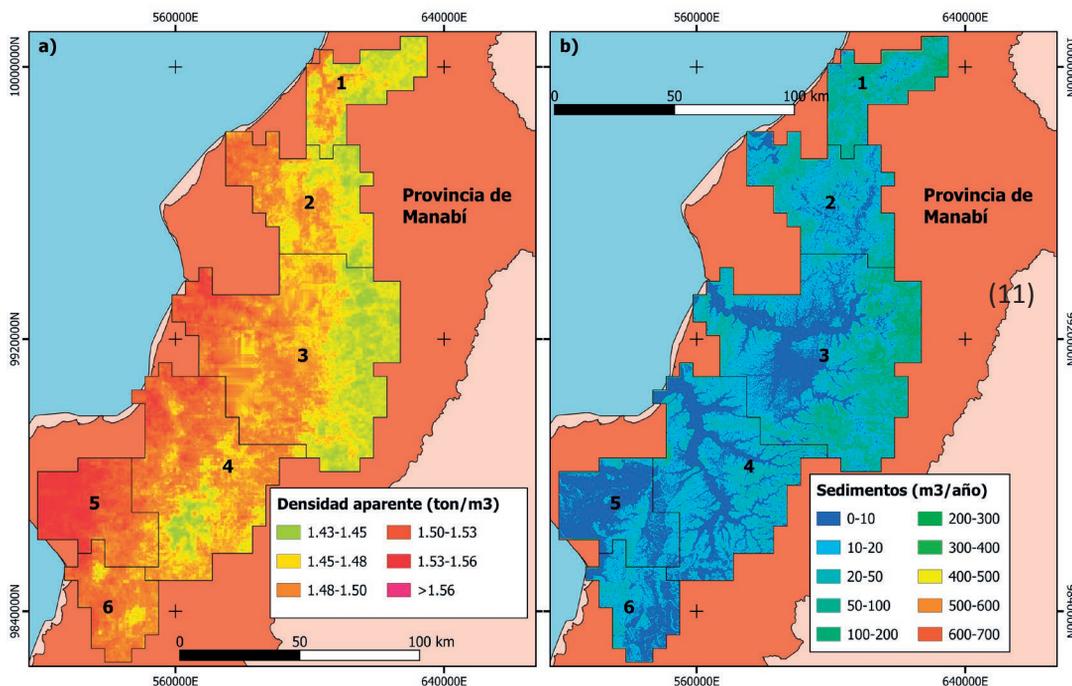
Para esto, considerando las unidades de las tasas de erosión ( $\text{ton ha}^{-1}$ ) y las propiedades de los sedimentos, se ha propuesto la utilización de la densidad aparente (Dap, en  $\text{ton m}^{-3}$ ) de las propiedades físicas del suelo (arcilla, limo, arena).

La Dap ha sido identificada como una de las propiedades del suelo más utilizada en la agricultura y en la estimación de sedimentos debido a que representa un índice de la masa seca de las partículas en un volumen total del suelo, incluyendo los vacíos y poros (Salamanca y Sadeghian, 2006; Antúnez *et al.*, 2015). Para la presente investigación se utilizaron los valores de Dap típicos propuestos por Lutters y Salazar (1999) en base a la textura del suelo (Tabla 4).

**Tabla 4.** Valores típicos de la densidad aparente del suelo según su textura (obtenidos desde los valores base de Lutters y Salazar, 1999).

Textura del suelo	Densidad aparente típica ( $\text{ton/m}^3$ )
Arena	1,76
Limo	1,43
Arcilla	1,21

En la sección 2.2.2 se identificaron los contenidos de arcilla, limo y arena a escala de píxel en el territorio analizado. Para determinar el Factor K fue necesario inicialmente determinar el porcentaje de composición que cada característica del suelo representaba en cada píxel de 100 m. Debido a que en esta sección no se estuvo tomando en cuenta al carbono orgánico, se consideró que los contenidos de arena, arcilla y limo representaron el 100% de cada píxel y, posteriormente, se obtuvo una Dap promedio a esta escala de análisis (píxel). Además, las tasas de erosión RUSLE de la Ecuación 10 correspondieron a una pérdida del suelo normalizada con un valor máximo de  $1000 \text{ ton ha}^{-1}$ , con



**Figura 12.** Distribución espacial de la densidad aparente (a) y la estimación de volúmenes de sedimentos (b) en las cuencas manabitas.

la finalidad de eliminar los valores sesgados y que no influyeran negativamente en la estimación correcta del volumen de sedimentos.

La Figura 12a muestra la distribución espacial de la densidad aparente en las cuencas manabitas. Los valores oscilaron entre  $1,44 \text{ ton m}^{-3}$  y  $1,57 \text{ ton m}^{-3}$ , con un valor promedio de  $1,49 \text{ ton m}^{-3}$ . Estos valores indican que el suelo analizado es más compacto y corrobora la presencia mayoritaria de arena en las cuencas manabitas. Se observó que la densidad aparente tuvo un incremento en su magnitud de este a oeste, y que los valores más altos se concentraron en los sectores de las cuencas que están más próximas al Océano Pacífico.

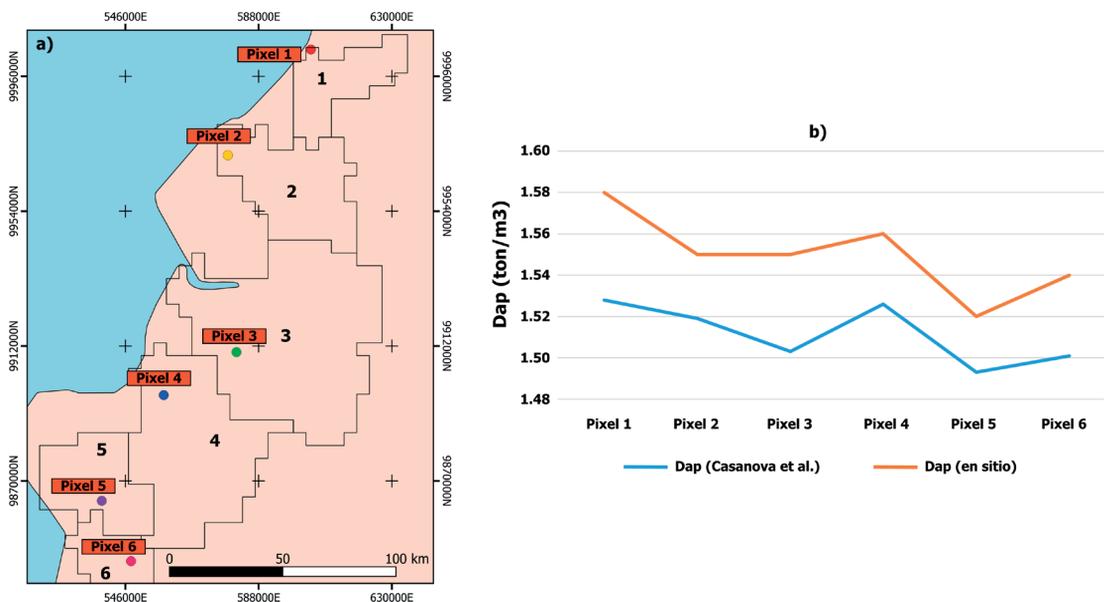
En cuanto a la estimación de sedimentos, la Figura 12b permitió determinar que los valores oscilaron entre  $0,06 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  y  $692,43 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ . Se puede observar que, mediante esta metodología, los cuerpos de agua y las zonas con pendientes y elevaciones muy próximas a 0 (cercanas al nivel del mar) generan valores de sedimentos muy cercanos a los  $0 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ . Esto resulta lógico debido a que, inicialmente, la metodología propuesta no estima los sedimentos en suspensión dentro de los cuerpos de agua, porque considerando el enfoque RUSLE, un cuerpo de agua no posee una

capa superficial de tierra expuesta directamente a la lluvia y que pueda erosionarse. Con respecto a los valores de pendientes y elevaciones bajas, un valor muy cercano a 0 en cualquiera de los seis factores de RUSLE, generará tasas de erosiones relativamente bajas.

A nivel de cuencas, Coaque (Id 1 en Figura 12b) es la que registró el promedio de sedimentos más altos, con un valor de  $112,39 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ , seguido de Jama (Id 2 en Figura 12b) con  $57,05 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ , mientras que la cuenca Caña (Id 5 en Figura 12b) fue la que registró la menor cantidad en la generación de sedimentos con tan solo  $17,82 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ .

### 3.5. Validación de los valores de la densidad aparente a escala de píxel

La Figura 13a muestra la distribución de los píxeles escogidos para realizar la validación de los resultados de la densidad aparente obtenidos mediante la utilización de valores típicos asignados a los ráster de las texturas del suelo (Luters y Salazar, 1999) y mediante un análisis convencional *in situ*. El análisis convencional consistió en considerar la capa superficial del suelo para estimar la densidad aparente en laboratorio. La



**Figura 13.** Distribución espacial de los píxeles escogidos para la validación de la Dap (a). La figura (b) compara diferentes estimaciones de Dap entre la metodología de Casanova *et al.* y un análisis convencional en sitio en los seis píxeles analizados.

extracción de las muestras se realizó con un cilindro metálico de 295 cm<sup>3</sup>, el cual fue introducido en la capa superficial del suelo con la ayuda de un martillo, procurando no alterar sus condiciones naturales. Posteriormente, las muestras obtenidas fueron pesadas y se calculó la Dap aplicando la siguiente ecuación (Ecuación 11):

$$D_{ap} = \frac{m}{v} \quad (11)$$

Donde Dap corresponde a la densidad aparente en g cm<sup>-3</sup> (equivalente a ton m<sup>-3</sup>), m es la masa en g y v es el volumen en cm<sup>3</sup> (que corresponde al volumen del cilindro metálico).

Se consideró analizar un pixel en cada cuenca manabita para mejorar la fiabilidad de la comparación (Figura 13a). Mediante la Figura 13b se puede observar que los valores obtenidos entre la Dap (Casanova *et al.*) y Dap (*in situ*) son muy similares, registrando una diferencia promedio inferior al 3% y un coeficiente de Pearson de 0,89, considerado estadísticamente fiable. Además, la metodología propuesta subestima ligeramente los valores de Dap en comparación a las estimaciones en campo, lo que indica que los valores típicos de Dap empleados en cada de las texturas de suelo analizadas fueron ligeramente inferiores a las de la zona de estudio.

Se puede concluir que nuestra rutina de R, que calculó la densidad aparente considerando los contenidos de arena, arcilla y limo en las cuencas manabitas y la posterior asignación de una Dap típica para cada una de estas texturas de suelos, cuantificó correctamente las magnitudes y la distribución espacial de esta propiedad del suelo en la zona de estudio. Esto demuestra la robustez y confiabilidad de la metodología propuesta, obteniendo resultados adecuados que cumplen con los objetivos de la presente investigación.

### 3.6. Potencial uso de las tasas de sedimentos en la provincia de Manabí

Varias investigaciones han mostrado su preocupación por la falta de análisis de la pérdida del suelo en Ecuador (Pacheco *et al.*, 2019; Delgado *et al.*, 2021b; Delgado *et al.*, 2022; Delgado *et al.*, 2023) y, en general, en todo Sudamérica (Borrelli *et al.*, 2021). Esto limita también las utilidades complementarias que esta información puede generar,

como la creación de medidas y programas de mitigación ante eventuales procesos erosivos.

Dentro de la provincia de Manabí, la estimación de sedimentos se ha empleado principalmente en la determinación de los factores de seguridad en taludes (Macías *et al.*, 2021) y análisis del estado de los embalses (Molerio, 2018, Zambrano *et al.*, 2022). Sin embargo, existen muchos problemas viales asociados a un funcionamiento inadecuado de las alcantarillas (Delgado *et al.*, 2021a; Ortiz *et al.*, 2022) por considerar únicamente los caudales de lluvia al momento de su diseño y programación de mantenimiento (Rodríguez y Hernández, 2023), dejando a un lado la relevancia de los sedimentos en su vida útil y funcionalidad. Como uso potencial de la estimación de sedimentos y por la carencia preocupante de análisis de las alcantarillas considerando este volumen, se propone como perspectiva de futura investigación, estimar el caudal de sedimentos que llega a una microcuenca (que será únicamente el área que aporta a la alcantarilla analizada) mediante la utilización del volumen de sedimentos presentado en esta investigación, pudiendo emplear programas de simulación de caudales como HEC-RAS y la posterior evaluación de las propiedades hidráulicas mediante la utilización de softwares como HY-8, que fue desarrollado por el Departamento de Transporte de Estados Unidos y que permite determinar las profundidades del flujo de sedimentos tanto al ingreso como a la salida de la alcantarilla, así como en su interior. Cabe recalcar que el objetivo principal de la presente investigación es determinar los volúmenes de sedimentos a partir del modelo RUSLE, pero se considera importante plantear esta perspectiva de análisis que incentive a los investigadores a incursionar en esta importante temática dentro de la zona de estudio, pudiendo generar ecuaciones empíricas que permitan estimar el tiempo de mantenimiento en las alcantarillas y así evitar problemas viales como los presentados actualmente en la zona de estudio y que sean incluidos dentro de los planes de mitigación por parte de las entidades competentes.

### 3.7. Principales limitaciones de la investigación

La información satelital con escalas espaciales iguales o superiores a 1 km (GPM y NDVI) presentó una distribución espacial más generalizada.

Es decir, la distribución por píxel no pudo ser más detallada por las limitaciones del proceso de escalado. Por ejemplo, para el caso de GPM, la escala espacial nativa fue de 10 km y se modificó a una escala de 100 m. Esto generó que grupos mayores de píxeles compartieran magnitudes similares. Sin embargo, es importante mencionar que la base de datos nacional proporcionada por el INAMHI posee información muy limitada e incompleta, que no brinda confiabilidad al momento de generar investigaciones de gran calidad (Erazo *et al.*, 2018; Delgado *et al.*, 2022). A esto se le suma una distribución espacial inadecuada de las estaciones de aforo y el costo económico para acceder a dicha información. Por tanto, la metodología empleada al momento de obtener la base de datos de precipitaciones para calcular el Factor R y el NDVI para calcular el Factor C, no son considerados limitantes para la obtención de resultados confiables.

El transporte de sedimentos dentro de un sistema será conducido hasta un cuerpo de agua limitado según su suministro y no es lo mismo que la estimación de los volúmenes de sedimentos. Es decir, el flujo de sedimentos por área dependerá de la cantidad de suelo perdido (volumen) y de la capacidad de transporte que tiene el cuerpo de agua (Li *et al.*, 2022). Estas distintas capacidades conducirán a diferentes tasas de transporte de erosión, lo que genera diferentes grados reales de erosión que pueden ser distintos a lo calculado convencionalmente (Thomas *et al.*, 2018). La presente investigación estima el volumen de sedimentos considerando todo el suelo perdido por la erosión potencial obtenida mediante el modelo RUSLE, sin tomar en cuenta la capacidad de transporte real de los ríos (es decir, no estima el flujo o caudal de sedimentos dentro de los cuerpos de agua). Los resultados mostrados simulan un escenario extremo de generación de volúmenes de sedimentos que puede ocurrir en el área de estudio. Será importante, como una perspectiva futura de la investigación, aplicar modelos que determinen la distribución espacio-temporal neta aplicando modelos correctivos como el “Transporte de entrega limitada de sedimentos (TLSD)” propuesta por Li *et al.* (2022).

Con respecto a la cuantificación de la densidad aparente, la utilización de valores típicos para las tres texturas de suelos consideradas en la presente investigación podría generalizar la realidad de la

zona de estudio desde este enfoque. Sin embargo, realizar un análisis *in situ* de esta propiedad del suelo en las cuencas manabitas resultaría muy complicado y costoso. Además, las cuantificaciones se realizarían por muestreos lo que también generalizaría las condiciones de las zonas no analizadas, las que serían abarcadas mediante un proceso de interpolación. La validación de datos a escala de píxel permitió determinar que la diferencia promedio entre los valores fue inferior al 3%, lo que demuestra una buena robustez y confiabilidad de la metodología planteada. Sin embargo, nuestra metodología propuesta subestimó ligeramente los valores de Dap por lo que se recomienda realizar un análisis más detallado en cada una de estas tres texturas del suelo y obtener un Dap típico corregido que permita mejorar aún más las estimaciones de los volúmenes de sedimentos.

Las incertidumbres y limitaciones analizadas en esta sección no se consideran perjudicialmente relevantes en la aplicación de esta metodología a escala provincial en Ecuador. Pese a esto, se recomienda implementar mejoras en el futuro, como la utilización de bases de datos con resoluciones espaciales originales más finas (menores a 1 km) para evitar sesgos generados por una distribución más generalizada (especialmente para la obtención de precipitaciones). La recolección de información estadística *in situ* sobre los cultivos en las cuencas manabitas (área de cobertura, tipos y ciclos de cultivos, prácticas agrícolas empleadas, entre otros), permitirá validar mapas satelitales de uso y cobertura del suelo y obtener resultados más adecuados y con mejores resoluciones espaciales, además de caracterizar apropiadamente el Factor P (que con la carencia de datos es considerado como 1) y obtener aproximaciones más precisas relacionadas a las tasas de erosión del suelo y a la estimación de volúmenes sedimentos.

#### 4. Conclusiones

La estimación de volúmenes de sedimentos mediante el modelo RUSLE fue aplicado por primera vez a escala provincial en Manabí. Las precipitaciones, factor desencadenante de la erosión hídrica, tuvieron una distribución espacial regular que mostró que las lluvias se van debilitando mientras se acercan al Océano Pacífico. La distribución espacial de la erosión del suelo mostró una gran variabilidad en las seis cuencas

manabitas analizadas. En general, se observó que el Factor LS tuvo una mayor repercusión en la estimación de las tasas de erosión, lo que significó que la pérdida del suelo esté mayormente condicionada por el relieve del territorio. Esto permitió registrar tasas de erosión que oscilaron entre 0,10 ton ha<sup>-1</sup> y 3252,22 ton ha<sup>-1</sup>. Sin embargo, un análisis más detallado reveló un fuerte sesgo en los rangos erosivos cuando las tasas de erosión fueron superiores a 1000 ton ha<sup>-1</sup>, lo que significaba que los valores que superaban este límite eran poco representativos.

El análisis de la variabilidad espacial de las tasas de erosión considerando el tipo de cobertura, no permitió identificar una tipología destacada en el momento de generar las pérdidas de suelo más perjudiciales, lo que demuestra que la erosión del suelo en las cuencas manabitas no está principalmente condicionada por su cobertura. Los valores de densidad aparente obtenidos mediante la metodología propuesta generaron magnitudes que oscilaron entre 1,44 ton m<sup>-3</sup> y 1,57 ton m<sup>-3</sup>, con un valor promedio de 1,49 ton m<sup>-3</sup>. Esto también permite corroborar la importancia de la arena en la composición del suelo dentro de la zona de estudio. La validación de la densidad aparente a escala de píxel permitió identificar que el modelo propuesto es robusto y confiable, lo que se vio reflejado en una diferencia promedio inferior al 3% considerando los resultados obtenidos en laboratorio mediante un muestreo en sitio. Los volúmenes de sedimentos variaron entre 0,06 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> y 692,43 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> a escala de píxel en las cuencas manabitas, destacando que, mediante esta metodología, los cuerpos de agua y las zonas con pendientes y elevaciones muy próximas a 0 (cercanas al nivel del mar) generan valores de sedimentos muy cercanos a los 0 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>.

Entre los beneficios del modelo propuesto está obtener volúmenes de sedimentos a escala de píxel, lo que permite establecer áreas de estudio a conveniencia y que no estén limitados a un análisis de cuerpos de agua o unidades territoriales según la división política del país. Esta información se considera un sustento importante para establecer medidas enfocadas al manejo integral y al uso del suelo en la provincia de Manabí.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Suelcon Concreto & Asfalto y al Doctor Eduardo Ortiz Hernández (investigador de la Universidad Técnica de Manabí-Ecuador) por proporcionar los instrumentos necesarios para realizar el análisis de la densidad aparente en los puntos de muestreo de las cuencas manabitas. Un agradecimiento especial a los doctores Eduardo Tejeda Piusseaut (Coordinador de la Maestría en Ingeniería Civil – Mención Vialidad de la Universidad Técnica de Manabí-Ecuador) y Mahrez Sadaoui (investigador de la Universidad de Perpignan-Francia), por el valioso aporte al desarrollo de la presente investigación.

## Referencias

- Ahmed, I.A., Talukdar, S., Islam, A.R.M.T., Rihan, M., Malafaia, G., Bera, S., Ramana, G.V., Rahman, A. 2023. Contribution and behavioral assessment of physical and anthropogenic factors for soil erosion using integrated deep learning and game theory. *Journal of Cleaner Production*, 137689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137689>
- Al Rammahi, A.H.J., Khassaf S.I. 2018. Estimation of soil erodibility factor in RUSLE equation for Euphrates River watershed using GIS. *GEOMATE Journal*, 14(46), 164–169. <https://doi.org/10.21660/2018.46.87788>
- Antúñez, A., Felmer, S., Vidal, M., Morales, R., Coz, E., Fuentes, F. 2015. Propiedades físico-hídricas del suelo en el cultivo del maíz grano. *Boletín FAO*, 31-50.
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J.A.A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A., Gessesse, G., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., Freppaz, M., Panagos, P. 2021. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the total environment*, 780, 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L., Panagos, P. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications*, 8(1), 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>

- Cover, M.L., Change, L.C. 1999. MODIS land cover product algorithm theoretical basis document (ATBD) version 5.0. MODIS documentation, 42-47.
- Delgado, D., Quiroz, S., Casanova, G., Álava, M.A.C., da Silva, J.P.C. (2021a). Urban Mobility Characterization and Its Application in a Mobility Plan. Case Study: Bahía de Caráquez – Ecuador. In: da Costa Sanches Galvão, J.R., et al. *Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability* (ICoWEFS 2021). ICoWEFS 2021. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3_64)
- Delgado, D., Sadaoui, M., Pacheco, H., Méndez, W., Ludwig, W. 2021b. Interrelations between soil erosion conditioning factors in basins of Ecuador: contributions to the spatial model construction. In *International Conference on Water Energy Food and Sustainability* (pp. 892-903). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3\\_94](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3_94)
- Delgado, D., Sadaoui, M., Ludwig, W., Méndez, W. 2022. Spatio-temporal assessment of rainfall erosivity in Ecuador based on RUSLE using satellite-based high frequency GPM-IMERG precipitation data. *Catena*, 219, 106597. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106597>
- Delgado, D., Sadaoui, M., Ludwig, W., Mendez, W. 2023. Depth of the pedological profile as a conditioning factor of soil erodibility (RUSLE K-Factor) in Ecuadorian basins. *Environmental Earth Sciences*, 82(12), 286. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10944-w>
- Desmet, P., Govers, G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51, 427–433.
- Erazo, B., Bourrel, L., Frappart, F., Chimborazo, O., Labat, D., Dominguez-Granda, L., Matamoros, D. y Mejia, R. 2018. Validation of satellite estimates (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) for rainfall variability over the Pacific slope and Coast of Ecuador. *Water*, 10(2), 213. <https://doi.org/10.3390/w10020213>
- Gallart, F., Marignani, M., Pérez-Gallego, N., Santi, E., Maccherini, S. 2013. Thirty years of studies on badlands, from physical to vegetational approaches. A succinct review. *Catena*, 106, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.02.008>
- Gartner, J.E., Cannon, S.H., Santi, P.M. 2014. Empirical models for predicting volumes of sediment deposited by debris flows and sediment-laden floods in the transverse ranges of southern California. *Engineering Geology*, 176, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.04.008>
- He, W., You, L., Chen, M., Tuo, Y., Liao, N., Wang, H., Li, J. 2023. Varied sediment archive of Fe and Mn contents under changing reservoir mixing patterns, oxygenation regimes, and runoff inputs. *Ecological Indicators*, 147, 109967. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109967>
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Stocker, E.F., Tan, J. 2019. V06 IMERG release notes. NASA/GSFC: Greenbelt, MD, USA.
- Kamel, D., Munoz, A.B., Ramon, S., Huete, A. 2015. *MODIS Vegetation Index User's Guide. Vegetation Index and Phenology Lab of The University of Arizona*, The University of Arizona: Tucson, AZ, USA.
- Keesstra, S.D., Bouma, J., Wallinga, J., Tiftonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J., N., Pachepsky, Y., Van del Putten, W., Bardgett, R., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B., Fresco, L.O. 2016. Forum paper: The significance of soils and soil science towards realization of the UN sustainable development goals (SDGS). *Soil Discussions*, 2016, 1–28.
- Knijff, J.M.F., Jones, R.J.A., Montanarella, L. 1999. *Soil erosion risk assessment in Italy*. Brussels, Belgium: European Soil Bureau, European Commission.
- Li, H., Guan, Q., Sun, Y., Wang, Q., Liang, L., Ma, Y., Du, Q. 2022. Spatiotemporal analysis of the quantitative attribution of soil water erosion in the upper reaches of the Yellow River Basin based on the RUSLE-TLSD model. *Catena*, 212, 106081. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106081>
- Luters, J.C., Salazar, J.P. 1999. *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Buenos Aires: United States Department of Agriculture (p. 88). CRN-CNIA-INTA.
- Macías, L., Loor, D., Ortiz-Hernández, E., Casanova, G., Delgado, D. 2021. Comparative Analysis of Soil Slope Stability, Using Dynamic and Pseudo-static Methods on the Garrapata - Santa Maria Road, Manabí Province, Ecuador. In: da Costa Sanches Galvão, J.R., et al. *Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability* (ICoWEFS 2021). ICoWEFS 2021. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3\\_55](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3_55)
- Masroor, M., Sajjad, H., Rehman, S., Singh, R., Rahaman, M.H., Sahana, M., Ahmed, R., Avtar, R. 2022. Analysing the relationship between drought and soil erosion using vegetation health index and RUSLE models in Godavari middle sub-basin, India. *Geoscience Frontiers*, 13(2), 101312. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101312>
- Mendoza, E.F.M., Arteaga, E.A.G., Delgado, D. 2023. La erosividad de la lluvia como factor condicionante de la erosión hídrica en Manabí. *Polo del Conocimiento*, 8(2), 68–81.

- Molerio León, L.F. 2018. Gestión de recursos hidráulicos bajo riesgo de terremotos en Ecuador: 1. Sismotectónica. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(3), 3–17.
- 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.
- Ortiz, R., Zambrano, C., García-Vinces, J., Delgado, D. 2022. Análisis de los accidentes de tránsito en varios cantones del Ecuador. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT*, 7(1). <https://doi.org/10.33936/riemat.v7i1.4838>
- Pacheco, H.A., Méndez, W., Moro, A. 2019. Soil erosion risk zoning in the Ecuadorian coastal region using geo-technological tools. *Earth Sciences Research Journal*, 23(4), 293–302. <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n4.71706>
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rousseva, S., Perčec, M., Michaelides, S., Hrabalíková, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumutrescu, A., Beguería, S., Alewell, C. 2015. Rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment*, 511, 801–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>
- Polykretis, C., Alexakis, D.D., Grillakis, M.G., Manoudakis, S. 2020. Assessment of intra-annual and inter-annual variabilities of soil erosion in Crete Island (Greece) by incorporating the Dynamic “Nature” of R and C-Factors in RUSLE modeling. *Remote Sensing*, 12(15), 2439. <https://doi.org/10.3390/rs12152439>
- Pourrut, P. 1994. *L'eau en Equateur: principaux acquis en hydroclimatologie*. ORSTOM éditions.
- Ramos-Diez, I., Navarro-Hevia, J., Fernández, R.S.M., Díaz-Gutiérrez, V., Mongil-Manso, J. 2017. Evaluating methods to quantify sediment volumes trapped behind check dams, Saldaña badlands (Spain). *International Journal of Sediment Research*, 32(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.06.005>
- Räsänen, T.A., Tähtikarhu, M., Uusi-Kämpä, J., Piirainen, S., Turtola, E. 2023. Evaluation of RUSLE and spatial assessment of agricultural soil erosion in Finland. *Geoderma Regional*, 32, e00610. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00610>
- Renard, K.G. 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Rodríguez, M.A.V., Hernández, D.O.A. 2023. Evaluación de la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático de las estructuras de drenaje en carreteras. *Revista Ciencia y Construcción*, 4(1), 37–47.
- Salamanca, A., Sadeghian, S. 2006. *La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana*.
- Sarmiento, F.O., Rodríguez, J., Yopez-Noboa, A. 2021. Forest Transformation in the Wake of Colonization: The Quijos Andean Amazonian Flank, Past and Present. *Forests*, 13(1), 11. <https://doi.org/10.3390/f13010011>
- Scott, K.M., Williams, R.P. 1978. *Erosion and sediment yields in the Transverse Ranges, southern California* (Vol. 1030). US Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/pp1030>
- Sparovek, G., Schnug, E. 2001. Temporal erosion-induced soil degradation and yield loss. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5), 1479–1486. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551479x>
- Thomas, J., Joseph, S., Thrivikramji, K.P. 2018. Assessment of soil erosion in a tropical mountain river basin of the southern Western Ghats, India using RUSLE and GIS. *Geoscience Frontiers*, 9(3), 893–906. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.05.011>
- Tian, P., Zhu, Z., Yue, Q., He, Y., Zhang, Z., Hao, F., Guo, W., Chen, L., Liu, M. 2021. Soil erosion assessment by RUSLE with improved P factor and its validation: Case study on mountainous and hilly areas of Hubei Province, China. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(3), 433–444. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.04.007>
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). 1999. *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. Obtenido en línea el 15/07/2023. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20y%20Salud%20del%20Suelo.pdf>
- Valeriu, P.C. 2023. Applying RUSLE for soil erosion estimation in Romania under current and future climate scenarios. *Geoderma Regional*, e00687. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00687>
- Williams, J.R. 1995. Chapter 25. The EPIC Model. p. 909–1000. In *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO.
- Zambrano Mero, J.D., Delgado Párraga, A.G., Zambrano Mero, E.T., Peñaherrera Villafuerte, S.L. 2022. Contaminantes biológicos presentes en fuentes de agua del centro-sur de la provincia de Manabí, Ecuador. *Siembra*, 9(2), e4011. <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i2.4011>