


Artículo original


**Modelado de la erosión hídrica del suelo
mediante la metodología USLE en la
cuenca del río Caplina al sur de Perú**

**Modeling of Soil Water Erosion Using the USLE
Methodology in the Caplina River Basin in Southern
Peru**


JOSÉ MIGUEL CALDERÓN CÁRDENAS¹

 <https://orcid.org/0009-0003-8566-6257>

SUNDUS DELIA DEL PILAR VIZCARRA SOTO²

 <https://orcid.org/0009-0003-8398-493X>

CARMEN ROSA ROMÁN ARCE³

 <https://orcid.org/0000-0003-1601-1794>

Recibido: 20/07/2024

Aceptado: 01/11/2024

Publicado: 20/11/2024

¹Unidad de Gestión de Áreas Verdes, Municipalidad Provincial de Tacna, Tacna, Perú

^{2,3}Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú

E-mail: ¹jmiguelo516@hotmail.com, ²pilarvs20@hotmail.com, ³carromana@upt.pe



Resumen

La erosión hídrica es uno de los procesos más comunes de degradación del suelo a nivel mundial, especialmente en regiones áridas y semiáridas, con efectos negativos en la productividad agrícola, la estabilidad ecológica y los recursos hídricos. Este estudio tuvo como objetivo modelar la pérdida de suelo en la cuenca del río Caplina, ubicada en Tacna al sur de Perú, mediante la metodología de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), evaluando factores como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la pendiente y longitud del terreno, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del suelo. Los resultados mostraron que la erosión nula o ligera predomina en más del 55 % del área, mientras que las zonas con erosión alta y crítica, aunque menos extensas, se concentran en pendientes pronunciadas con escasa cobertura vegetal. El análisis multitemporal evidenció un incremento leve en áreas con menor vulnerabilidad, mientras que las zonas críticas permanecen estables, lo que subraya la necesidad de acciones específicas. Finalmente, se resalta la importancia del monitoreo continuo, la implementación de técnicas de conservación del suelo y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, elementos clave para reducir la vulnerabilidad a la erosión y garantizar un manejo sostenible del suelo en la región.

Palabras clave: análisis espacial; cuencas hidrográficas; ecosistemas áridos; gestión ambiental.

Abstract

Water erosion is one of the most common processes of soil degradation worldwide, particularly in arid and semi-arid regions, with negative effects on agricultural productivity, ecological stability, and water resources. This study aimed to model soil loss in the Caplina River basin, located in Tacna, southern Peru, using the Universal Soil Loss Equation (USLE) methodology and Geographic Information System (GIS) tools, evaluating factors such as rainfall erosivity, soil erodibility, slope and length of the land, vegetation cover, and soil management practices. The results showed that negligible or light erosion predominates in more than 55 % of the area, while areas with high and critical erosion, although less extensive, are concentrated in steep slopes with poor vegetation cover. The multitemporal analysis revealed a slight increase in areas with lower vulnerability, while critical areas remain stable, highlighting the need for specific actions. Finally, the importance of continuous monitoring, the implementation of soil conservation techniques, and the promotion of sustainable agricultural practices is emphasized, as these are key elements in reducing vulnerability to erosion and ensuring sustainable land management in the region.

Keywords: spatial analysis; watersheds; arid ecosystems; environmental management.



1. Introducción

La erosión del suelo (ES) es el proceso mediante el cual las partículas superficiales del suelo se desprenden y son transportadas por agentes físicos como la lluvia, el agua que fluye, el viento o el hielo (Eurostat, 2020). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), la erosión del suelo afecta aproximadamente al 33 % de las tierras cultivables del planeta (Etchevers-Barra et al., 2020). Entre los diferentes tipos de erosión, la erosión hídrica del suelo (EHS) se ha identificado como un fenómeno impulsado tanto por factores naturales como antropogénicos. Los factores naturales incluyen características como el clima, la topografía y la composición del suelo, mientras que los factores inducidos por el ser humano abarcan prácticas como la agricultura intensiva, la deforestación, el sobrepastoreo, la urbanización descontrolada y la sobreexplotación de los recursos naturales (Gantulga et al., 2023; Shekar y Mathew, 2024; Wondrade, 2023). En particular, el cambio climático ha intensificado las dinámicas de este proceso al incrementar la frecuencia e intensidad de las lluvias torrenciales en muchas regiones del mundo, lo que ha provocado la pérdida de suelos fértiles, el deterioro de la calidad del agua y la reducción de la capacidad productiva de las tierras, especialmente en áreas donde la vegetación que protege el suelo ha sido eliminada o degradada. Además, afecta la estabilidad de los ecosistemas, la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible en diversas regiones del mundo (Li y Fang, 2016).

Shojaeezadeh et al. (2024) menciona que, en regiones semiáridas la EHS constituye un desafío crítico, impulsado por factores como las precipitaciones irregulares, la topografía accidentada, la escasa cobertura vegetal y las prácticas agrícolas inadecuadas. En esa línea, en Perú, este problema se agrava debido a la diversidad geográfica y climática del país, especialmente en las regiones andinas y costeras, donde las altas pendientes, las lluvias estacionales intensas y las actividades agrícolas insostenibles generan tasas significativas de pérdida de suelo. Estas dinámicas no solo comprometen la productividad agrícola y la seguridad alimentaria, sino que también incrementan riesgos como deslizamientos y sedimentación en cuerpos de agua, afectando la estabilidad ecológica y los recursos hídricos (Delgado, 2020; Escobar y Soto, 2021).

En este contexto, el uso de modelos predictivos y herramientas analíticas ha cobrado relevancia en la investigación y gestión de la ES. Entre las metodologías más utilizadas se encuentra la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), desarrollada como una herramienta empírica para estimar la pérdida de suelo a partir de factores clave que determinan el proceso erosivo. La metodología USLE, introducida por Wischmeier y Smith (1978), marcó un hito en el estudio y modelado de la ES. Esta herramienta matemática permite estimar la pérdida promedio de suelo por erosión hídrica a partir de cinco factores principales: la erosividad de las precipitaciones (R), la erodabilidad del suelo (K), las características topográficas (LS), la cobertura vegetal y manejo del suelo (C), y las prácticas de conservación (P). La USLE fue concebida inicialmente para su aplicación en terrenos agrícolas específicos, pero su simplicidad y adaptabilidad han permitido su uso en una amplia gama de contextos geográficos y climáticos a nivel mundial. Su capacidad para integrar factores climáticos, edáficos, geomorfológicos y de manejo del suelo lo convierte en una metodología adecuada para identificar áreas críticas y planificar medidas de conservación. Adicionalmente, el desarrollo de tecnologías geoespaciales, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

y el análisis de imágenes satelitales, ha mejorado la precisión y eficiencia en la aplicación de este modelo (Balabathina et al., 2020; Carollo et al., 2024; Pham et al., 2018).

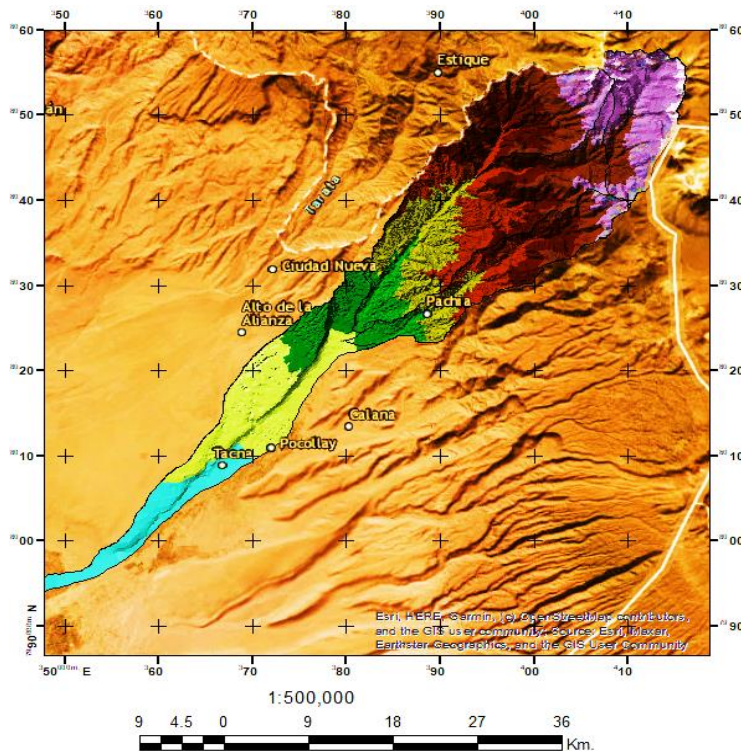
Por lo tanto, el objetivo del estudio fue modelar la pérdida de suelo en la cuenca del río Caplina, ubicada en Tacna al sur de Perú, mediante la metodología USLE y herramientas SIG.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El área de estudio fue la cuenca del río Caplina, ubicada al sur del Perú. De acuerdo a Pino (2013) abarca un área de 4239,09 km² y se extiende en dirección noreste-suroeste. Este sistema hidrográfico incluye al río Palca como su principal afluente y atraviesa los distritos de Palca, Pachía, Calana, Pocollay, Ciudad Nueva, Alto de la Alianza, Gregorio Albarracín y Tacna (Figura 1). El área se caracteriza por un clima árido, una topografía accidentada y prácticas agrícolas intensivas, lo que la convierte en una zona vulnerable a la erosión hídrica. El territorio, abarca áreas que combinan condiciones geográficas, climáticas y socioeconómicas únicas. Su importancia no solo radica en su capacidad de suministro hídrico para la agricultura y el consumo humano, sino también en su rol en el mantenimiento de ecosistemas locales que dependen de la calidad del suelo y del agua. Sin embargo, las características geomorfológicas de la cuenca, junto con la actividad humana intensiva y el impacto del cambio climático, han transformado la región en un área altamente susceptible a la erosión hídrica. En particular, los eventos de lluvias concentradas, característicos de los periodos estacionales en esta zona, generan un impacto directo en la pérdida de suelo, agravando la degradación de los recursos naturales y comprometiendo su sostenibilidad a largo plazo.

Figura 1
Mapa de la zona de estudio





2.2. Recolección y procesamiento de datos

Para llevar a cabo la investigación, se utilizó la metodología USLE (*Universal Soil Loss Equation*) junto con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los datos necesarios se obtuvieron de fuentes confiables: las precipitaciones anuales para calcular la erosividad (R) provinieron de estaciones meteorológicas locales; las características del suelo se extrajeron del mapa digital de suelos proporcionado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés); el Modelo Digital de Elevación (DEM) de alta resolución sirvió para calcular la pendiente y longitud del terreno (LS); y las imágenes Landsat 8 y 9, obtenidas del portal Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), permitieron determinar la cobertura vegetal y manejar el suelo (C). Todo el procesamiento de datos se realizó en el software ArcMap.

2.3. Cálculo de los factores de erosión

El factor de erosividad de la lluvia (R) se calculó empleando la ecuación de Rouse (1974), tal como se muestra en la ecuación 1:

$$R = 1,73 \times 0,5 \times P \quad (1)$$

Donde P corresponde a la precipitación media anual expresada en milímetros. Esto permitió generar un mapa de isoerodientes que muestra la distribución espacial de la energía de las lluvias en la subcuenca. Además, se consideraron factores como la intensidad de la lluvia y la frecuencia de eventos extremos. Áreas con valores altos de R representan mayor potencial erosivo debido a la intensidad de las lluvias.

La susceptibilidad del suelo a la erosión (Factor K) se determinó a partir de las características del suelo, como textura, contenido de carbono orgánico y estructura. El cálculo de se estimó utilizando la fórmula que se muestra en la ecuación 2:

$$K = 0,1317 \times A \times B \times C \times D \quad (2)$$

En la que A, B, D y C corresponden a las proporciones de arena (0,05 – 2 mm), limo (0,002 – 0,05 mm), arcilla (<0,002 mm) y contenido de carbono orgánico (%), respectivamente. Los valores para cada parámetro se obtuvieron del análisis de datos espaciales y se integraron en un mapa temático.

El factor de longitud y pendiente del terreno (LS) se calculó combinando la longitud (L) y el grado de pendiente (S) del terreno, derivados del DEM, según la ecuación 3 propuesta por Wischmeier y Smith (1978):

$$LS = \left(\frac{L}{22,13}\right)^m \times (0,065 + 0,045S + 0,0065S^2) \quad (3)$$

Donde L y S son la longitud de la pendiente expresada en metros y la pendiente expresada en porcentaje. Mientras que la m es la exponente que varía de acuerdo a los valores de la pendiente para condiciones locales. Estos valores se agruparon y clasificaron en un mapa temático que muestra las áreas con diferentes grados de susceptibilidad a la erosión.

Para el factor de cobertura vegetal y manejo del suelo (C) las imágenes Landsat se procesaron para calcular el Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI) mediante la ecuación 4:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (4)$$

Donde NIR representan las reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano y Red el espectro visible rojo, respectivamente. Los valores obtenidos se transformaron en la ecuación 5:

$$C = \frac{1 - NDVI}{2} \quad (5)$$

Luego, se representaron en mapas temáticos multitemporales para los años 2013, 2016, 2019 y 2023, mostrando la evolución de la cobertura vegetal. Por último, el factor de prácticas de conservación (P) se asumió con un valor de 1, dado que no se identificaron prácticas de manejo del suelo en el área de estudio.

2.4. Integración, análisis y validación de resultados

Finalmente, se aplicó en el entorno SIG mediante una operación de celdas para combinar los valores de los cinco factores, siguiendo la ecuación 6:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (6)$$

Esto permitió calcular la pérdida estimada de suelo expresada en toneladas por hectárea por año. Se generaron mapas de distribución espacial de erosión para los años analizados, clasificando las áreas en categorías de erosión nula, ligera, moderada y alta. Esto permitió identificar zonas críticas que requerían intervención prioritaria.

3. Resultados

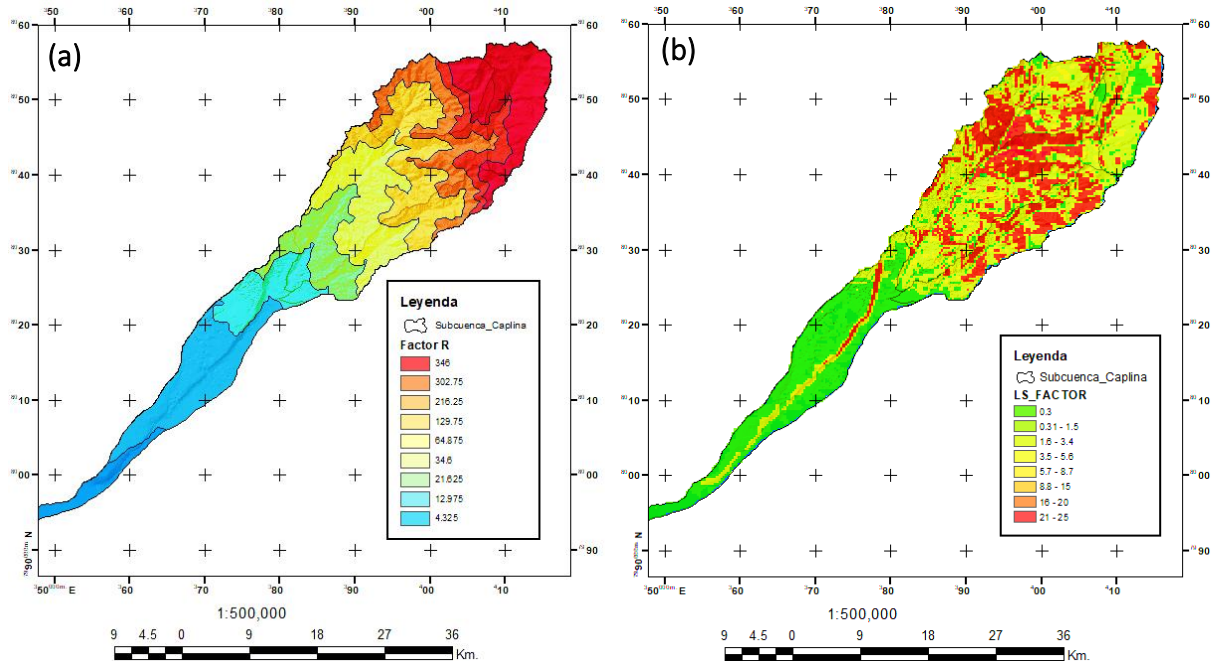
Los factores considerados en la ecuación USLE mostraron variaciones significativas en la subcuenca del río Caplina, lo que permitió identificar áreas con diferentes grados de susceptibilidad a la erosión hídrica.

El factor R presentó valores que oscilaron entre 4,325 y 346. Las áreas con mayor erosividad se localizaron en el norte de la cuenca, donde las lluvias son más intensas y concentradas, representando el 12,8 % de la superficie total (139 km²). En contraste, el sur de la cuenca mostró valores menores a 34,6, abarcando el 48 % del área total (520 km²) (Figura 2a). El factor K osciló entre 0,02247 y 0,02831. Las zonas más vulnerables se asociaron a suelos con mayor contenido de limo y bajo carbono orgánico, ubicadas en áreas de pendientes moderadas a altas (18–30 % de inclinación). Estas áreas abarcaron aproximadamente 21 % del área total (228 km²). El factor LS presentó valores que incrementaron con la pendiente, alcanzando máximos superiores a 25,2 en áreas con pendientes mayores al 70 %. Estas áreas, aunque representaron solo el 0,86 % de la subcuenca (9,8 km²), concentran las mayores tasas de erosión (Figura 2b). El factor C varió entre 0,2 y 0,6, según la densidad de vegetación. Durante 2023, áreas con cobertura escasa (C>0,5) abarcaron el 1,1 % del área total (10,2 km²),



concentrándose en el noreste. Por otro lado, zonas dominadas por cultivos y arbustales ($C \sim 0,4C$) representaron el 96,9 % (885,5 km²).

Figura 2
Modelado del mapa de los factores R y LS



Nota. (a) y (b) se refieren a los mapas de la erosividad de las precipitaciones (R) y las características topográficas (LS).

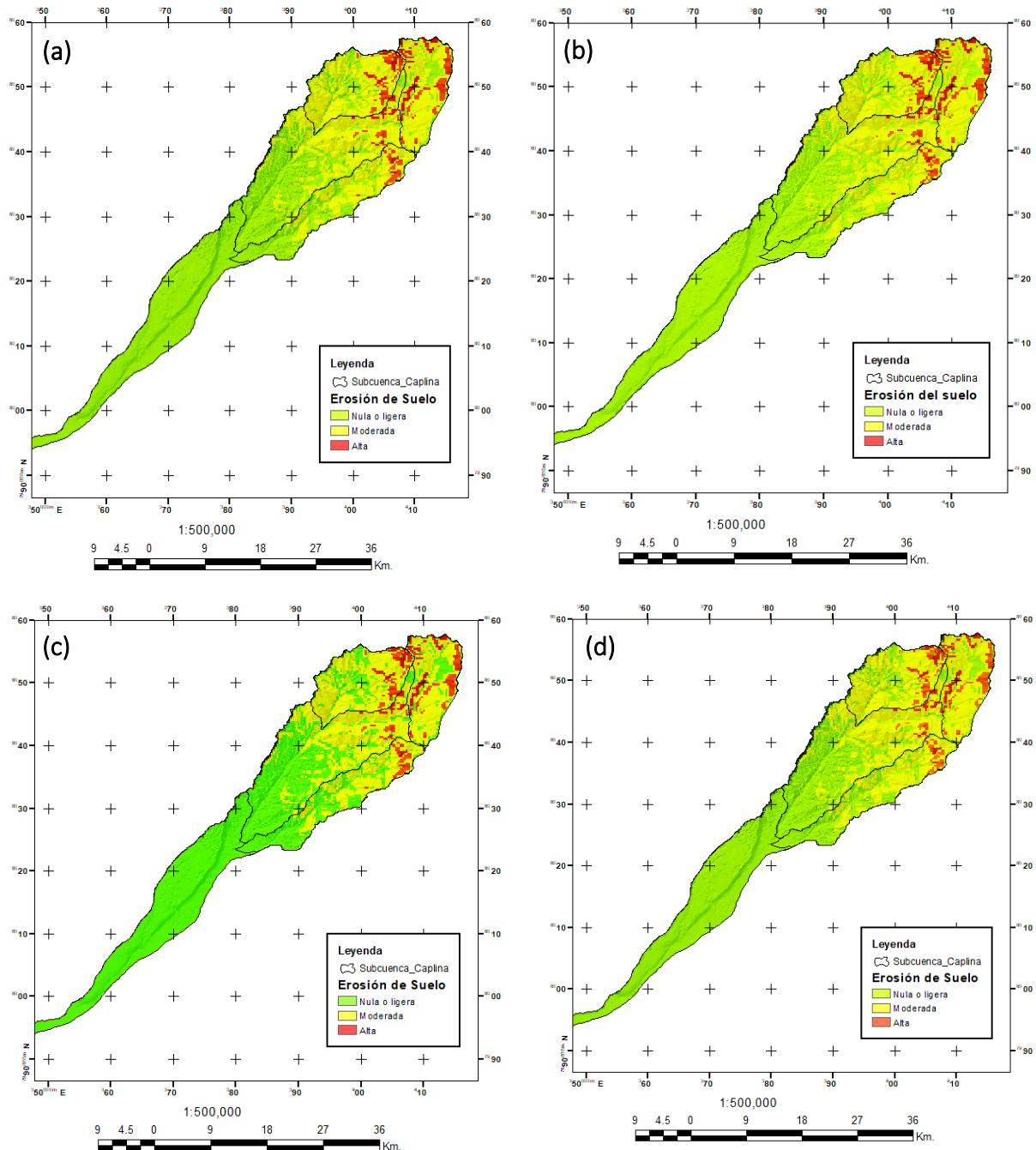
La estimación de la pérdida de suelo mediante la ecuación USLE mostró una distribución diferenciada de la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina, con predominancia de las categorías de erosión nula o ligera (Figura 3). Durante el periodo analizado, esta categoría, correspondiente a valores inferiores a 5 Tn/ha/año, representó la mayor parte del área, abarcando un 55,85 % (485,8 km²) en 2013 y aumentando ligeramente al 56,20 % (489,4 km²) en 2023. Estas áreas, ubicadas principalmente en las zonas central y sur de la subcuenca, se caracterizan por pendientes suaves, inferiores al 12 %, y una cobertura vegetal adecuada, factores que limitan significativamente la pérdida de suelo. Por otro lado, la erosión moderada, con valores de 5 a 25 Tn/ha/año, mostró una leve fluctuación a lo largo del tiempo. Aunque disminuyó marginalmente, pasando del 27,44 % (238,3 km²) en 2013 al 27,56 % (241,1 km²) en 2023, sigue siendo la segunda categoría más representativa. Estas áreas, localizadas mayoritariamente en el noreste de la subcuenca, están asociadas a pendientes entre 12 % y 30 %, combinadas con una cobertura vegetal menos densa que en las zonas de erosión nula.

La categoría de erosión alta, que comprende valores entre 25 y 50 Tn/ha/año, experimentó una leve reducción en su extensión, disminuyendo del 16,71 % (145,3 km²) en 2013 al 16,24 % (141,5 km²) en 2023. Estas áreas se concentran en las pendientes más pronunciadas, superiores al 30 %, y en suelos con baja cobertura vegetal, lo que incrementa su vulnerabilidad a la pérdida de suelo. Finalmente, la erosión crítica, con valores superiores a 50 Tn/ha/año, aunque representa una proporción mínima, se mantuvo constante a lo largo del tiempo, ocupando aproximadamente el 0,5 % del área total (5,4 km²). Estas áreas críticas se

encuentran en sectores con pendientes extremas y muy poca cobertura vegetal, lo que las convierte en zonas prioritarias para la implementación de medidas de conservación del suelo.

Figura 3

Modelado multitemporal del mapa de erosión del suelo



Nota. (a), (b), (c) y (d) abarcan los periodos de tiempo de 2013, 2016, 2019 y 2023 respectivamente.

4. Discusión

Li y Fang (2016) expresan que la erosión hídrica se está convirtiendo en un desafío cada vez más relevante en un contexto de cambio climático global, donde las lluvias intensas y los fenómenos meteorológicos extremos se han vuelto más comunes. No obstante, el presente



estudio encontró que la erosión nula o ligera predominó en más del 55 % del área durante todos los años analizados, mostrando un ligero incremento del 0,35 % entre 2013 y 2023. Estos valores son consistentes con investigaciones previas realizadas en cuencas similares. Al evaluar la microcuenca del río Puela en Ecuador utilizando la misma metodología, Ramos y Sánchez (2023) reportaron que el 60 % del área presentaba erosión leve o nula, atribuida a pendientes suaves y una cobertura vegetal estable. Sin embargo, las áreas con erosión alta y crítica en la cuenca del río Caplina, aunque reducidas en extensión, se concentraron en sectores con pendientes pronunciadas y suelos con alta erodabilidad. Este hallazgo coincide con lo reportado por Jaramillo (2015) en la subcuenca del río Portoviejo, donde las pendientes superiores al 30 % representaron las zonas más vulnerables, destacando la influencia de la topografía y la cobertura vegetal en la intensidad de la erosión.

A diferencia de estudios previos, este trabajo incluye un análisis multitemporal que permitió observar tendencias en las categorías de erosión a lo largo de una década. Se identificó un ligero aumento en las áreas de erosión alta, del 5,35 % en 2013 al 5,65 % en 2023, lo que sugiere un deterioro gradual de ciertas zonas, probablemente asociado a cambios en el uso del suelo y prácticas agrícolas insostenibles. Así mismo, la coherencia de los resultados se confirmó al comparar las distribuciones espaciales de los factores LS, K y C con las áreas de mayor pérdida de suelo. Las zonas críticas, con valores altos de LS (superiores a 25) y cobertura vegetal escasa ($C > 0,5$), correspondieron a las áreas con mayor erosión estimada, alineándose con los supuestos teóricos del modelo USLE. Esta consistencia valida la aplicación del modelo y subraya la importancia de los datos geoespaciales para mejorar la precisión en la evaluación de la erosión.

Respecto a las implicancias para la gestión del suelo se destacan la necesidad de priorizar medidas de conservación en áreas con erosión alta y crítica. Las pendientes pronunciadas y la deficiente cobertura vegetal identificadas en el noreste de la subcuenca requieren intervenciones inmediatas, como la implementación de terrazas agrícolas, la revegetación con especies nativas y la construcción de estructuras de control de escorrentía. Estas medidas coinciden con las recomendaciones de Herrera-Castro y Herrera-López (2009), quienes resaltaron la efectividad de las barreras vivas y la agroforestería en regiones similares. Además, el análisis multitemporal revela la importancia de adoptar estrategias sostenibles de manejo del suelo para evitar que áreas con erosión moderada evolucionen hacia categorías más severas. La promoción de prácticas agrícolas como la rotación de cultivos, el uso de cultivos de cobertura y la labranza mínima podría mitigar esta transición.

Por último, aunque los resultados son consistentes, se identificaron algunas limitaciones. La asignación de un valor constante al factor P debido a la falta de datos sobre prácticas de manejo del suelo podría haber subestimado la influencia de medidas de conservación existentes. Asimismo, el uso de datos de precipitación anual promedio para el cálculo del factor R no considera la variabilidad intraanual de las lluvias, lo que podría afectar la precisión en áreas donde los eventos de lluvia intensa son frecuentes. Para investigaciones futuras, la integración de modelos dinámicos de cambio de uso del suelo podría permitir anticipar las tendencias futuras de erosión y planificar medidas de conservación más efectivas. Este enfoque podría replicarse en otras cuencas con características similares, contribuyendo a una gestión integral de los recursos naturales en el Perú y el mundo.

5. Conclusiones

La investigación refleja la efectividad de la metodología USLE combinada con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar patrones espaciales y tendencias multitemporales en la pérdida de suelo. Este análisis proporciona una base para comprender las dinámicas de erosión y planificar estrategias de conservación del suelo en la región. Ya que esta problemática tiene implicaciones ecológicas, económicas y sociales, por ende, demanda herramientas eficaces para su análisis y gestión.

La implementación de estrategias y medidas específicas para mitigar la erosión del suelo resulta esencial para garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales y la estabilidad ecológica de la región. El monitoreo continuo y la capacitación en manejo sostenible del suelo son fundamentales para garantizar la efectividad y adaptabilidad de las estrategias de conservación. Además, las evaluaciones periódicas del suelo y el agua, combinadas con incentivos económicos y la colaboración interinstitucional, son indispensables para fortalecer la planificación del uso del suelo y garantizar la implementación eficaz de medidas de mitigación a largo plazo.

6. Referencias Bibliográficas

- Balabathina, V. N., Raju, R. P., Muluaem, W., y Tadele, G. (2020). Estimation of soil loss using remote sensing and GIS-based universal soil loss equation in northern catchment of Lake Tana Sub-basin, Upper Blue Nile Basin, Northwest Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00203-3>
- Carollo, F. G., Serio, M. A., Pampalone, V., y Ferro, V. (2024). The unit plot of the Universal soil loss equation (USLE): Myth or reality? *Journal of Hydrology*, 632(130880), 130880. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130880>
- Delgado, J. (2020). Estimación de la pérdida de suelos utilizando el modelo USLE y herramientas SIG, en la cuenca del río Chillón, Lima, Perú. *South Sustainability*, 1–11. <https://doi.org/10.21142/ss-0101-2020-007>
- Escobar, J. S., y Soto, C. (2021). *Erosión hídrica mediante el modelo USLE para la sostenibilidad del suelo de la subcuenca Vilca a través de sistemas de información geográfica en la región Huancavelica 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/64730>
- Etchevers-Barra, J. D., Cotler-Ávalos, H., y Hidalgo-Moreno, C. (2020). Salir de la invisibilidad: nuevos retos para la ciencia del suelo. *Terra Latinoamericana: organo científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C*, 38(4), 931–939. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.867>
- Eurostat. (2020). *Agri-environmental indicator - soil erosion*. <https://goo.su/L2p3>
- Gantulga, N., limaa, T., Batmunkh, M., Surenjav, U., Tserennadmin, E., Turmunkh, T., Denchingungaa, D., y Dorjsuren, B. (2023). Impacts of natural and anthropogenic factors on soil erosion. *Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences*, 3–18. <https://doi.org/10.5564/pmas.v63i02.1416>



- Herrera-Castro, E., y Herrera-López, D. (2009). *Evaluación de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo: Municipio San José de los Remates* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria]. <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/2076>
- Jaramillo, J. (2015). *Estudio del riesgo por erosión hídrica del suelo utilizando el modelo U.S.L.E. mediante herramientas S.I.G. aplicando en la subcuenca río Portoviejo, provincia de Manabí* [Tesis de maestría, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/4235>
- Li, Z., y Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 163, 94–117. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004>
- Pham, T. G., Degener, J., y Kappas, M. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>
- Pino, C. A. (2013). *Caracterización hidro geomorfológica de la cuenca del río Caplina – Tacna* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/9422cda9-7fdc-439a-959f-72fd7f35104b>
- Ramos, B. A., y Sánchez, E. S. (2023). *Estimación de la pérdida de suelo utilizando el modelo USLE y herramientas SIG, en la microcuenca del río Puela, cantón Penipe* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10459>
- Rouse, J., Hass, R., Schell, J., y Deering, D. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Paper- A20*. NASA Technical Reports Server. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Shekar, P. R., y Mathew, A. (2024). GIS-based assessment of soil erosion and sediment yield using the revised universal soil loss equation (RUSLE) model in the Murredu Watershed, Telangana, India. *HydroResearch*, 7, 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.05.003>
- Shojaeezadeh, S. A., Al-Wardy, M., Nikoo, M. R., Mooselu, M. G., Talebbeydokhti, N., Alamdari, N., y Gandomi, A. H. (2024). Historical hazard assessment of climate and land use–land cover effects on soil erosion using remote sensing: Case study of Oman. *Remote Sensing*, 16(16), 2976. <https://doi.org/10.3390/rs16162976>
- Wischmeier, W., y Smith, D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning*. The U.S. Government Printing Office. Department of Agriculture, Agricultural Handbook. <https://goo.su/FJgz>
- Wondrade, N. (2023). Integrated use of GIS, RS and USLE model for LULC change analysis and soil erosion risk mapping in the Lake Hawassa Watershed, Southern Ethiopia. *Geocarto International*, 38(1). <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2210106>