

Geospatial Technologies for Hydric Erosion Management in the Llaucano River, Cajamarca 2024

Mariela Imasumac Huaman¹, Vilma Chilon De La Cruz¹, Gladys Sandi Licapa Redolfo², Edilberto Gastolomendo Malimba¹

¹Universidad Privada del Norte, Perú. *N00183205@upn.pe, N00255371@upn.pe, N00219829@upn.pe*

²Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú. *gladys.licapa@upn.edu.pe*

Abstract – This study aimed to evaluate the susceptibility to water erosion in the Llaucano River basin, located in Cajamarca, Peru, through the integration of geospatial technologies, multicriteria analysis, and territorial intelligence within a GIS environment. Due to increasing pressure on the soil from agricultural, urban, and mining activities in the area, official data from the Regional Government of Cajamarca and a Digital Elevation Model were used to generate the R, K, LS, C, and P factors. The results revealed an annual soil loss ranging from 1.01 to 5 t/ha/year, with a heterogeneous spatial distribution: 50.28% of the basin showed low susceptibility, 29.92% moderate, and 20.56% high to very high. The most critical areas coincided with steep slopes, shallow soils, and a lack of conservation practices. The analysis also identified forest fires as an aggravating factor, as they reduce vegetation cover. It is concluded that the implementation of integrated strategies for soil conservation, reforestation, and fire control is essential to mitigate soil loss and ensure the sustainability of the territory.

Keywords – Water Erosion, USLE, Soil Susceptibility, Watershed.

Tecnologías Geoespaciales para la Gestión de la Erosión Hídrica en la Cuenca del Río Llaucano, Cajamarca 2024

Mariela Imasumac Huaman Bazan¹, Vilma Chilon De La Cruz¹; Gladys Sandi Licapa Redolfo²; Edilberto Gastolomendo Malimba¹

¹Universidad Privada del Norte, Perú. N00183205@upn.pe, N00255371@upn.pe, N00219829@upn.pe

²Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú. gladys.licapa@upn.edu.pe

Resumen— El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca del río Llaucano, ubicada en Cajamarca, Perú, mediante la integración de tecnologías geoespaciales, análisis multicriterio e inteligencia territorial en un entorno SIG. Ya que, por la creciente presión sobre los suelos debido a actividades agrícolas, urbanas y mineras en la zona, se utilizaron datos oficiales del Gobierno regional de Cajamarca y un Modelo Digital de Elevación para generar los factores R, K, LS, C y P. Los resultados revelaron una pérdida de suelo anual entre 1.01 y 5 t/ha/año, con una distribución espacial heterogénea: el 50.28% de la cuenca presentó baja susceptibilidad, el 29.92% moderada y un 20.56% alta a muy alta. Las zonas más críticas coinciden con áreas de fuerte pendiente, suelos poco profundos y ausencia de prácticas de conservacionistas. El análisis también identificó los incendios forestales como factor agravante, al reducir la cobertura vegetal. Se concluye que la implementación de estrategias integradas de conservación del suelo, reforestación y control de incendios es fundamental para mitigar la pérdida de suelo y asegurar la sostenibilidad del territorio.

Palabras clave—Erosión Hídrica, USLE, Susceptibilidad del Suelo, Cuenca.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las principales problemáticas ambientales a nivel mundial es el deterioro y erosión del suelo, así como el estrés hídrico creciente. Es frecuente encontrar áreas con signos evidentes de erosión, fenómeno que suele estar asociado a la falta de disponibilidad de agua, como durante los períodos de sequía. Además de esta forma de erosión vinculada a la escasez hídrica, también se presenta la erosión hídrica propiamente dicha, la cual genera contaminación sobre la calidad del agua superficial que fluye sobre el terreno. Este proceso incrementa la turbidez del agua, lo que representa un desafío para las plantas de tratamiento de agua potable, ubicadas comúnmente en las partes bajas de las cuencas. Asimismo, la erosión hídrica perjudica directamente al suelo, ya que arrastra grandes cantidades de nutrientes esenciales para mantener su fertilidad especialmente en zonas de cultivo [1].

Asimismo, contribuye a un desafío ambiental de gran envergadura a nivel global, comprometiendo la productividad del suelo, la calidad del agua y la biodiversidad de los ecosistemas. Este fenómeno, acentuado por factores climáticos y antrópicos como la deforestación y las prácticas agrícolas inadecuadas, demanda una evaluación y gestión rigurosa para mitigar sus efectos adversos. A escala internacional, la

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) ha sido ampliamente adoptada como un modelo predictivo para cuantificar la erosión, integrándose cada vez más con los Sistemas de Información geográfica (SIG) para análisis espaciales detallados [2], [3]. Además, la cobertura vegetal ha demostrado su capacidad para incrementar el tiempo de retardo de la escorrentía superficial, actuando como una barrera que reduce la erosión [4]. Los incendios forestales, en particular, provocan la pérdida de cobertura vegetal, dejando el suelo descubierto, y por consiguiente, más propenso a la erosión [5].

En el Perú no es ajeno a los problemas de erosión hídrica, la cual impacta significativamente diversas cuencas y regiones agrícolas. Investigaciones recientes han aplicado metodologías como la USLE y los SIG para evaluar y determinar el riesgo de erosión en el país. La deforestación, la agricultura intensiva y desproporcionada han acontecido las principales causas de erosión en diversas zonas del territorio peruano [6]. Estos estudios subrayan la necesidad de implementar estrategias de conservación del suelo y agua a nivel nacional, considerando las particularidades geográficas y climáticas de cada región.

A nivel local, la región de Cajamarca presenta condiciones geomorfológicas y de uso del suelo que la hacen susceptibles a estos procesos. En tal sentido es que se ha llevado a cabo investigaciones en la cuenca del río Llaucano, lo que indirectamente resalta la importancia de la salud de la cuenca en su conjunto [7]. Adicionalmente, estudios realizados en la cuenca del río Chonta en Cajamarca han determinado la degradación de suelo por causa del agua, lo que proporciona un precedente metodológico y contextual para la cuenca del Llaucano [8]. La aplicación de modelamiento geoespacial para la identificación de vulnerables territoriales de alto riesgo a peligro múltiples, demuestra también la relevancia de las herramientas SIG para abordar los desafíos ambientales en la región [9]. En este escenario, la evaluación de la susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca del río Llaucano se vuelve imperativa para desarrollar planes de manejo territorial que garanticen la sostenibilidad de sus recursos naturales y la resiliencia de las comunidades locales.

La erosión hídrica es un problema ambiental grave en regiones altoandinas como la cuenca del río Llaucano, Cajamarca, que degrada el suelo y afecta la calidad del agua e infraestructura. Este estudio se justifica por falta de información

espacial detallada, siendo crucial para la planificación y gestión sostenible del territorio. La metodología USLE mediante SIG y análisis multicriterio es idónea para generar conocimiento preciso, permitiendo la identificación de zonas de riesgo y la priorización de estrategias de conservación y mitigación. En este contexto, el objetivo de este estudio es evaluar la susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca del río Llaucano, Cajamarca, mediante la integración de tecnologías geoespaciales, análisis multicriterio e inteligencia territorial en un entorno SIG, aplicando el modelo USLE con datos oficiales biofísicas, con el fin de generar información estratégica que contribuya a la gestión sostenible del suelo.

II. METODOLOGÍA

A. Ámbito de Estudio

La cuenca del río Llaucano está localizada en la región nororiental de Marañón y abarca territorios de las provincias de Cajamarca, Hualgayoc, Chota y Cutervo, dentro del departamento de Cajamarca [7], por lo que nuestro ámbito de estudio abarca los territorios de Cajamarca y Hualgayoc, como lo muestra la figura 1. Asimismo, la cuenca del río Llaucano forma parte de la vertiente hidrográfica del atlántico y abarca una superficie de aproximadamente 2 545.73 Km². Su principal eje fluvial es el río Llaucano, que presenta una longitud de 116.91 Kilómetros [7]. Entre sus afluentes más importantes se encuentran los ríos Hualgayoc, Tingo y Pomagón. Esta cuenca cumple funciones esenciales para la región, siendo utilizada con fines poblacionales, agrícolas, mineros e industriales [10]. El área de estudio cuenta con una superficie de 81256.57 hectáreas, con una altitud mínima de 2397 y máxima de 4226 m.s.n.m., como muestra la tabla 1.

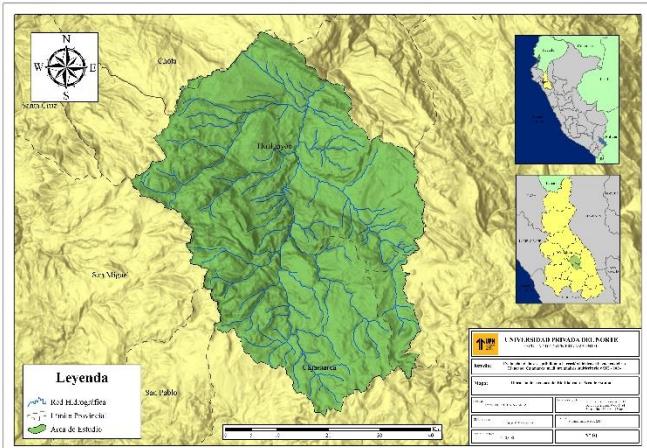


Fig. 1 Ubicación del área de estudio.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Variables	Unidad de Medida	Valor	
		Mínimo	Máximo
Altitud	m.s.n.m.	2397	4226
Superficie	ha	81256.57	
Perímetro	km	154.81	

B. Procesamiento de Datos

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo y espacial, sustentado en una metodología empírica, basada en la recopilación, procesamiento y análisis de datos provenientes de fuentes oficiales, como la mapoteca del Gobierno regional de Cajamarca. La metodología empírica se caracteriza por apoyarse en la observación, la experiencia y el uso de datos reales, lo cual permite establecer relaciones objetivas y verificables [11]. Mediante la aplicación del modelo USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) en un entorno SIG (ArcGIS Pro), se estimó la pérdida potencial de suelo por erosión hídrica, empleando variables cuantificables como precipitación, pendiente, tipo de suelo, uso del suelo y cobertura vegetal.

C. Método USLE

El presente estudio se llevó a cabo mediante la aplicación del modelo matemático conocido como Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Esta fórmula, ampliamente reconocida y utilizada a nivel global, permite estimar la pérdida media anual de suelo ocasionada por la erosión hídrica de tipo laminar. Su metodología se basa en una correlación empírica entre diversos factores que influyen en dicho proceso. La ecuación se expresa matemáticamente en la ecuación 1.

$$A = R * K * LS * C * P \dots \dots (1)$$

Donde:

- A:** Pérdida media anual de suelo
- R:** Erosividad de las lluvias
- K:** Erodabilidad del suelo
- LS:** Factor Topográfico
- C:** Coberturas del suelo
- P:** Prácticas de control a la erosión

El modelo USLE incorpora varios factores clave para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica.

El Factor R (Erosividad de la lluvia) se calcula como el producto entre la energía cinética de las precipitaciones y su intensidad máxima en un intervalo de 30 minutos [12]. Asimismo, la pertinencia de las ecuaciones utilizadas fue evaluada en función de la clasificación de sitio, obtenida a partir del análisis detallado de las condiciones locales, con el fin de determinar su aplicabilidad en el área de estudio. En particular, se realizaron ajustes en las ecuaciones del Factor R para adaptarlas a distintas zonas climáticas, teniendo en cuenta variaciones en las características de precipitación, los patrones climáticos y las propiedades del suelo, factores que inciden directamente en el potencial erosivo de las lluvias en diferentes regiones geográficas [13], tal es el caso que para procesar los datos obtenidos según el mapa de precipitaciones Multianual

del proyecto de Ordenamiento Territorial se la Región Cajamarca Zonificación Económica y Ecológica [14], se usó la ecuación 2.

$$R=0.5*P \dots \dots (2)$$

Donde:

P: Precipitación anual

0.5: Coeficiente aplicado adaptado a regiones Altoandinas

Posterior al cálculo del Factor R, se procedió a hacer el cálculo del Factor K (Erodabilidad del suelo), este factor refleja la vulnerabilidad del suelo a la designación provocada por el impacto de las gotas de lluvia [15]. Por otro lado, la información correspondiente a la cuenca del río Llaucano fue extraída de la base de datos de la mapoteca del Gobierno Regional de Cajamarca [16], mediante el procesamiento y la intersección espacial entre la capa de texturas, drenaje y profundidad efectiva del suelo y el área delimitada de la cuenca del río Llaucano y promediándola con la ecuación 3.

$$K = \frac{K_{textura} + K_{drenaje} + K_{profundidad\ efectiva}}{3} \dots \dots (3)$$

Donde:

K_{textura}: valor asignado según tipo de textura del suelo.

K_{drenaje}: valor asignado según tipo de textura del suelo.

K_{profundidad efectiva}: valor asignado según profundidad efectiva del suelo.

La presencia de una capa superficial de grava o piedras actúa como protección natural contra la erosión, reduciendo significativamente la pérdida de suelo. Para reflejar este efecto en el cálculo del factor K, se aplican coeficientes de ajuste en función del porcentaje de cobertura pedregosa. Por lo que, en suelos con fases pedregosas, grava o cantos rodados con una cobertura estimada del 25%, el valor de K se ajusta multiplicándolo por un factor de 0.7. Asimismo, para suelos con manto predominante de piedras, grava o cantos rodados, con una cobertura aproximada del 50%, el valor de K se reduce multiplicándolo por 0.4 [17].

El Factor LS representa el efecto combinado de la longitud y la inclinación de la pendiente sobre la pérdida de suelo por erosión hídrica [12]. Para su estimación, se aplicó la fórmula propuesta por Desmet y Govers (1996), quienes desarrollaron un procedimiento automatizado en SIG que mejora la precisión en terrenos con topografía compleja [18]. el cual se muestra en la ecuación 4.

$$LS = \left(\frac{A}{22.13} \right)^m * \left(\frac{\sin(\beta)}{0.0896} \right)^n \dots \dots (4)$$

Donde:

A: Área de contribución ascendente por unidad de ancho (en m²/m), derivada del acumulado de flujo.

β: Ángulo de la pendiente en radianes.

m: Exponente que depende de la pendiente.

n: Exponente que refleja el efecto de la pendiente.

El Factor C representa el efecto de la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del suelo sobre la pérdida de suelo por erosión hídrica. Para su estimación, se utilizó un enfoque basado en la asignación empírica de valores según el tipo de cobertura presente en la cuenca. Según el manual de conservación de suelos [19], establece que una mayor cobertura vegetal reduce significativamente la erosión, al proteger el suelo del impacto de las gotas de lluvia y disminuir la escorrentía superficial. Asimismo, describe cómo diferentes coberturas naturales o manejadas influyen en el comportamiento erosivo del terreno.

TABLA II
FACTOR C, SEGÚN EL USO DEL SUELO [20].

Clase de Uso del Suelo	Factor C	Descripción
Bosque denso (madera madura)	0.001 - 0.01	Vegetación densa que protege el suelo y minimiza la erosión.
Bosque ralo, matorrales, pastizales densos	0.01 - 0.1	Cobertura vegetal reduce la erosión en comparación con suelos desnudos.
Pastizales con pastoreo ocasional	0.1 - 0.2	El pastoreo puede reducir la cobertura vegetal y aumentar la erosión.
Cultivos anuales (rotación de cultivos)	0.2 - 0.4	Dependiendo de la práctica agrícola (siembra directa, labranza mínima, etc.) y la época del año.
Cultivos anuales (labranza convencional)	0.4 - 0.6	Labranza intensa puede aumentar la erosión.
Suelo desnudo, construcción	0.9 - 1.0	Mayor susceptibilidad a la erosión debido a la falta de protección.

El Factor P, representa la relación entre la erosión generada bajo una práctica específica de manejo del terreno y la que ocurriría en condiciones de cultivo en pendiente sin medidas de control. Refleja la efectividad de las prácticas de conservación del suelo, tales como la siembra en curvas de nivel, el cultivo en franjas, la implementación de terrazas y sus diversas combinaciones [12]. Para este estudio, se adoptó la metodología propuesta por Wischmeier y Smith (1978), citado por [21], quienes establecen que los valores del Factor P pueden ser asignados en función del uso del suelo y la pendiente del terreno. Según esta propuesta, a las áreas agrícolas se les asigna un valor P que varía según la pendiente, mientras que las áreas no agrícolas (zonas urbanas, forestales, cuerpos de agua, {áreas mineras}) reciben un valor constante de 1.00, al asumirse que no se aplican prácticas específicas de conservación. En la tabla 3 se muestra los valores.

TABLA III
FACTOR P, SEGÚN TIPO Y COBERTURA DEL SUELO [21].

Cobertura del suelo	Área (%)	Valor C	Referencia
Agricultura	21.06	0.6	Wischmeier & Smith (1978)
Área construida (urbana)	1.91	0.2	—
Bosque	26.96	0.02	—
Cuerpos de agua	1.12	0	—
Nieve y glaciares	16.93	0	Bouguerra et al. (2017)
Terreno árido	23.93	1	—
Pastizales	0.81	0.4	—
Huertos	0.94	0.5	Vezina et al. (2006)
Carreteras	0.04	0	Wang et al. (2016)

Para la aplicación operativa de las ecuaciones y la asignación de valores y la estimación de sus distintos factores, se utilizó el software ArcGIS Pro. Este entorno geoespacial permitió generar mapas temáticos relacionados con la erosión hídrica, mediante el uso de sus diversas herramientas de análisis espacial.

II. RESULTADOS

El presente estudio permitió estimar la Susceptibilidad a la erosión hídrica del suelo en la cuenca del río Llaucano mediante la aplicación del modelo USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) en un entorno SIG, utilizando ArcGIS Pro. Se integraron capas vectoriales oficiales proporcionadas por la mapoteca del Gobierno Regional de Cajamarca, junto con un Modelo de Elevación Digital (DEM) para representar con precisión la topografía de la cuenca.

Los factores que componen la ecuación USLE (R, K, LS, C, P) fueron calculados, especializados y analizados para generar un modelo integral de erosión hídrica que permita identificar las zonas con mayor vulnerabilidad y pérdida potencial de suelo.

A. Análisis de los factores de la ecuación USLE

En cuanto al Factor R (Erosividad de la lluvia), basado en un rango de precipitación anual entre los 100 y 1500 mm, se calculó un valor constante para toda la cuenca utilizando la ecuación (1), como se detalla en la Tabla IV.

TABLA IV
RANGO PROMEDIO DE PRECIPITACIONES

Rango de pp mm/año	Rango Promedio de pp	Valor Resultante
100 - 1500	1250	625

Este valor de 625, uniforme en toda la cuenca, como se visualiza en la figura 2, implica una intensidad de lluvias moderadamente alta, características de zonas altoandinas, y representa una presión constante sobre la estabilidad del suelo.

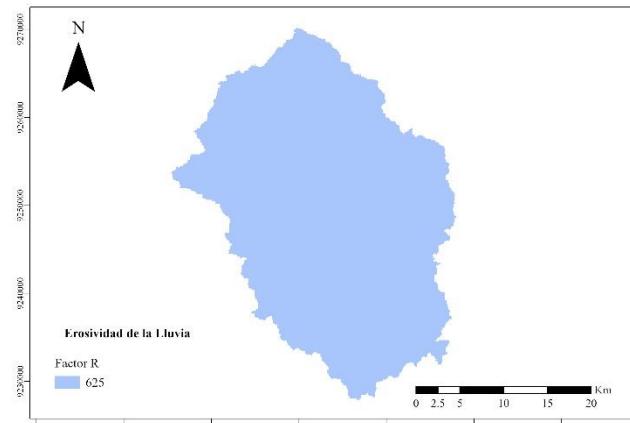


Fig. 2 Mapa del factor R (Erodabilidad del Suelo).

En cuanto al factor K (Erodabilidad del Suelo) se determinó a partir de tres atributos edáficos: Textura, Drenaje y Profundidad Efectiva, cuyos valores fueron normalizados y promediados para generar el raster K. los valores obtenidos oscilan entre .18 y 0.35, con una media de 0.27, reflejando suelos moderadamente susceptibles a la erosión, especialmente en áreas con texturas finas, drenaje deficiente y suelos superficiales como se muestra en las tablas V, VI, y VII.

TABLA V
TEXTURA DEL SUELO

Categoría	Valor K asignado
Media	0.32
Moderadamente fina	0.25
Moderadamente gruesa	0.18

TABLA VI
DRENAJE DEL SUELO

Categoría	Valor K asignado
Algo excesivo	0.15
Bueno	0.25
Pobre	0.35

TABLA VII
PROFUNDIDAD DEL SUELO

Categoría	Valor K asignado
Muy profundo	0.2
Moderadamente profundo	0.3
Superficial	0.4

Este proceso de promedio permitió representar de manera integrada a la susceptibilidad intrínseca del suelo a la erosión hídrica. Los valores finales para el Factor K oscilaron entre 0.01 y 0.31, se muestra en la figura 3. La visualización de este mapa indica que las zonas con suelos poco profundos y drenajes

deficientes son las más propensas a la erosión, una susceptibilidad que se agrava en laderas empinadas.

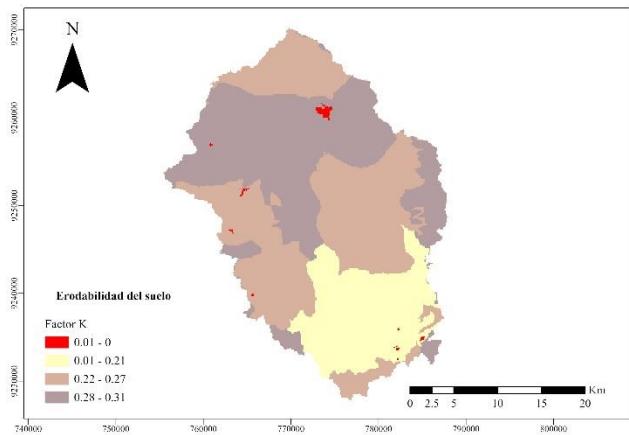


Fig. 3 Mapa del factor K (Erodabilidad del Suelo).

Factor LS (Longitud y Pendiente), cuyo valor varió entre 0.01 y 2.435, demostró tener un peso crítico en la ecuación (4) de erosión, con un promedio general de 0.689, como se observa en la figura 4, el mapa presenta valores entre 0.01 y 1 en la mayor parte del área de la cuenca. Esto indica que la topografía contribuye en diversos grados a la susceptibilidad del suelo más la erosión hídrica. Dentro de este rango, los valores más cercanos a 1 señalan la presencia de laderas con pendientes más pronunciadas y longitudes más extensas, donde el escurrimiento superficial puede acumular mayor energía cinética, incrementando significativamente el riesgo de arrastre de sedimentos. Por el contrario, los valores cercanos a 0.01 representan laderas con pendientes más suaves o longitudes más cortas, donde el potencial de erosión de origen topográfico es menor, aunque presente. En contraste, algunas áreas dispersas y de menor extensión, coloreadas de verde oscuro con rangos de 0.01 a 0, indican terrenos con pendientes muy suaves, donde la condición topográfica contribuye mínimamente al proceso erosivo, convirtiéndolas en puntos de menor preocupación desde la perspectiva del Factor LS.

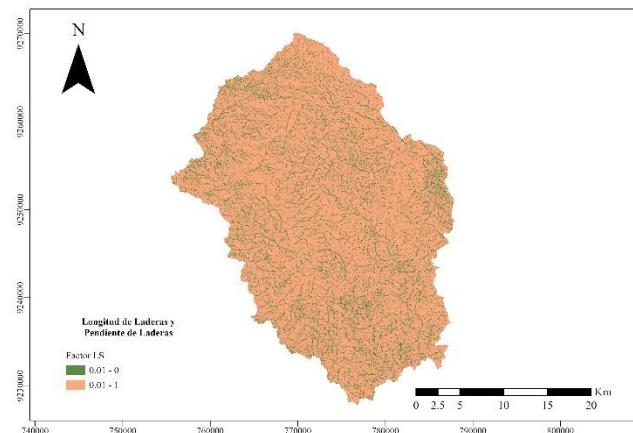


Fig. 4 Mapa del factor LS (Longitud de Ladera y Pendiente de Ladera).

En lo que respecta al Factor C (Uso del suelo), este fue reclasificado en función de su capacidad para proteger el suelo. Los valores de C oscilaron entre 0 para cuerpos de agua con máxima protección y 1 para áreas urbanas y mineras con nula protección. Las coberturas como bosques plantados, herbazales y pajonales actúan como coberturas protectoras, mientras que las áreas agrícolas, pastos y urbanas concentran la mayor exposición. En la Tabla VIII muestra los valores asignados al factor C según el tipo de uso del suelo.

TABLA VIII
PROFUNDIDAD DEL SUELO

Nº	Uso del suelo	Valor asignado
1	Tejido urbano continuo	1
2	Extracción minera	1
3	Pastos	0.1
4	Agrícolas heterogéneas	0.35
5	Bosque abierto bajo	0.1
6	Bosques plantados	0.05
7	Herbazal	0.06
8	Arbustal	0.08
9	Vegetación arbustiva/herbácea	0.1
10	Lagunas/lagos	0

En la figura 5, se visualiza esta clasificación espacialmente dentro de la cuenca. La mayor parte del área de estudio está dominada por tonalidades claras, que corresponden a valores entre 0.01 y 0.06. esto sugiere que gran parte de la cuenca posee una cobertura vegetal que ofrece una buena a muy buena protección contra la erosión asociada a la presencia de bosques plantados, herbazales y arbustales. Se identifican también zonas con protección moderada, con valores de 0.07 a 0.1, que corresponde a pastos y/o vegetación arbustiva/herbácea con menor densidad. Finalmente, las áreas con valores de 0.11 a 1, aunque menos extensas, son significativas y revelan zonas con

menor capacidad de protección, ligadas a usos agrícolas heterogéneos, tejido urbano y zonas de extracción minera, donde la exposición del suelo es máxima.

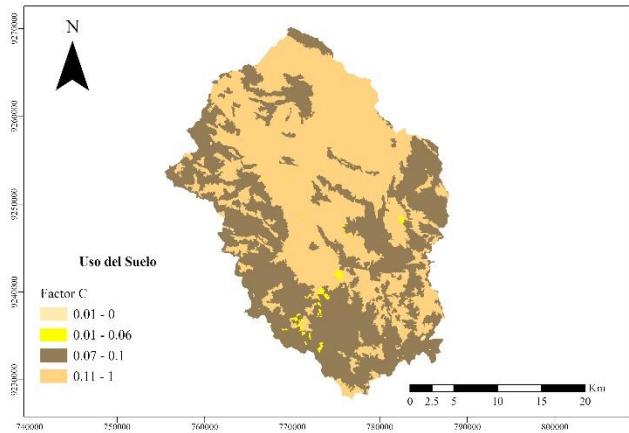


Fig. 5 Mapa del factor C (Uso del Suelo).

Factor P (prácticas de conservación) este factor muestra valores entre 0.0 y 1.0, con un promedio de 0.45. Los valores más bajos correspondieron a coberturas vegetales permanentes como bofedales y plantaciones forestales, mientras que las zonas agrícolas y urbanas presentan valores elevados, indicando poca o nula presencia de prácticas conservacionistas como lo muestra la tabla IX.

TABLA IX
VALORES ASIGNADOS PARA EL FACTOR P

Cobertura	Valor asignado
Centro minero / urbano	1
Agricultura	0.8
Pajonal andino	0.4
Matorral arbustivo	0.5
Plantación forestal	0.3
Bofedal	0.2
Cuerpos de agua	0

Asimismo, en la figura 6 se muestra variabilidad en la efectividad de las prácticas de conservación de suelos en la cuenca, predominan las áreas con efectividad limitada a mínima con valores de 0.61 a 0.8 que corresponden a zonas con matorrales o agricultura con pocas medidas, en tal sentido las áreas más críticas con valores de 0.81 a 1, aunque menos extensas, muestran una ausencia total o nula eficacia de las prácticas, asociadas principalmente a centros minero y urbanos.

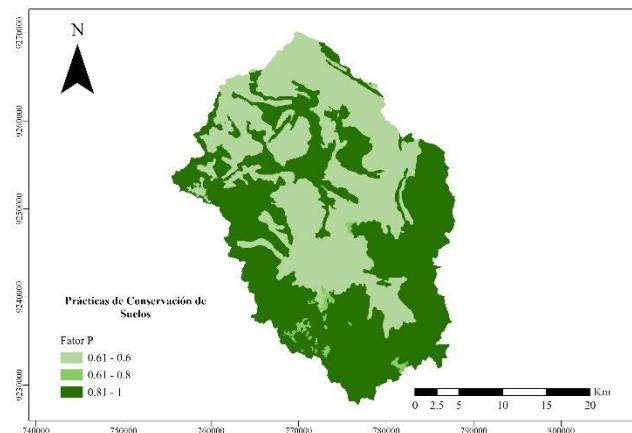


Fig. 6 Mapa del factor P (Cobertura Vegetal).

B. Cuantificación de la Erosión

En la figura 7 se categoriza la pérdida de suelo (t/ha/año) en la cuenca, en la que las que indican los valores de 1.01 a 2.07 t/ha/año el cual son áreas estables, con baja erosión debido a factores USLE favorables, es decir, pendiente suaves, suelos resistentes y buena cobertura. Las zonas con valores de 2.08 a 3.13 t/ha/año muestran una susceptibilidad moderada, indicando que algunos factores USLE son menos favorables, lo que requiere monitoreo. Las áreas con valores de 3.14 a 5 t/ha/año son las zonas críticas con erosión alta a muy alta, concentradas en el centro y partes del sureste como lo muestra la figura 8. Esta alta erosión se debe a una combinación desfavorable de factores USLE, como pendientes pronunciadas, suelos erodibles, escasa cobertura y prácticas de conservación ineficaces, siendo las principales áreas requiriendo acciones de mitigación urgentes.

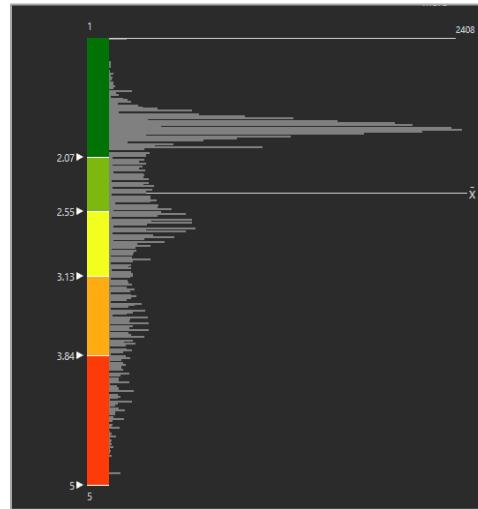


Fig. 7 Histograma de raster final con la aplicación del modelo USLE.

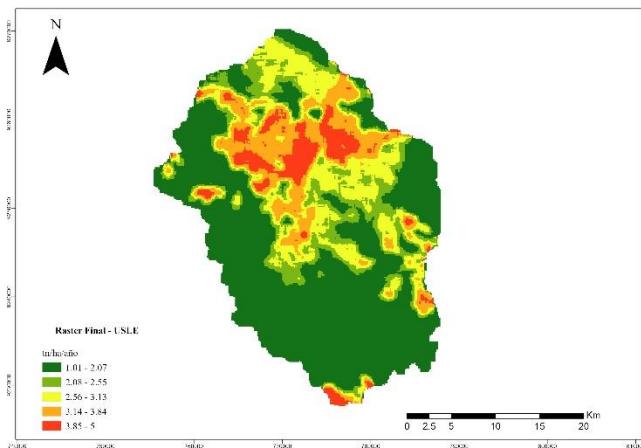


Fig. 8 Raster final con la aplicación del modelo USLE.

C. Susceptibilidad a la Erosión Hídrica

La evaluación de la susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca del río Llaucano se ha realizado mediante una clasificación en cinco categorías distintas, que permiten una compresión espacial del riesgo. Los datos cuantitativos de esta clasificación se presentan en la en la tabla X, y su distribución visual ofreciendo una perspectiva más clara de las áreas con mayor y menor susceptibilidad a la erosión.

TABLA X
CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD A EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO
LLAUCANO

Nº	Categoría	Área (ha)	%
1	Muy baja	214.03	0.24%
2	Baja	43928.27	50.28%
3	Moderada	26140.94	29.92%
4	Alta	13273.96	15.19%
5	Muy alta	3817.71	4.37%
Área Total		87374.90669	100.00%

El análisis de la vulnerabilidad a la erosión en la cuenca revela que el 50.28% presenta baja susceptibilidad, lo que representa una valiosa oportunidad para implementar acciones de conservación preventiva. Un 29.92% tiene susceptibilidad moderada, requiriendo atención prioritaria para evitar su deterioro. Sin embargo, un preocupante 20.56% se clasifica en alta y muy alta susceptibilidad como se muestra en la figura 9, áreas críticas ligadas a uso intensivo, minería o agricultura en laderas empinadas, demandando intervenciones urgentes. Finalmente, solo un 0.24% de la cuenca es muy estable, indicando una susceptibilidad generalizada a la erosión, el cual se muestra en la figura 10. Estos resultados son cruciales para una toma de decisiones basada en evidencia, permitiendo priorizar estrategias de rehabilitación en zonas críticas y de conservación proactiva en áreas de menor riesgo para asegurar la sostenibilidad del suelo.

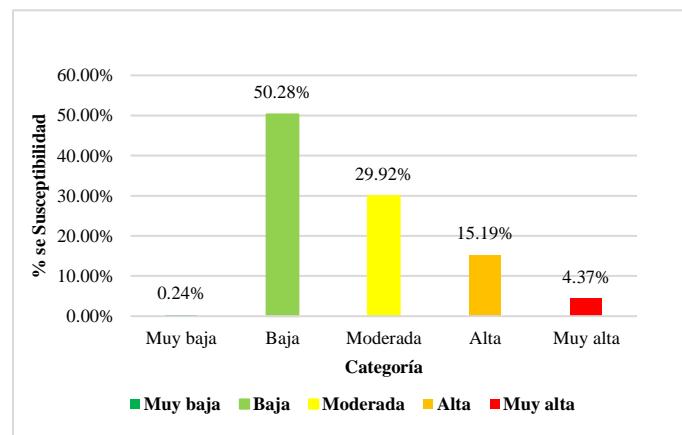


Fig. 9 Categorías de susceptibilidad a erosión hídrica.

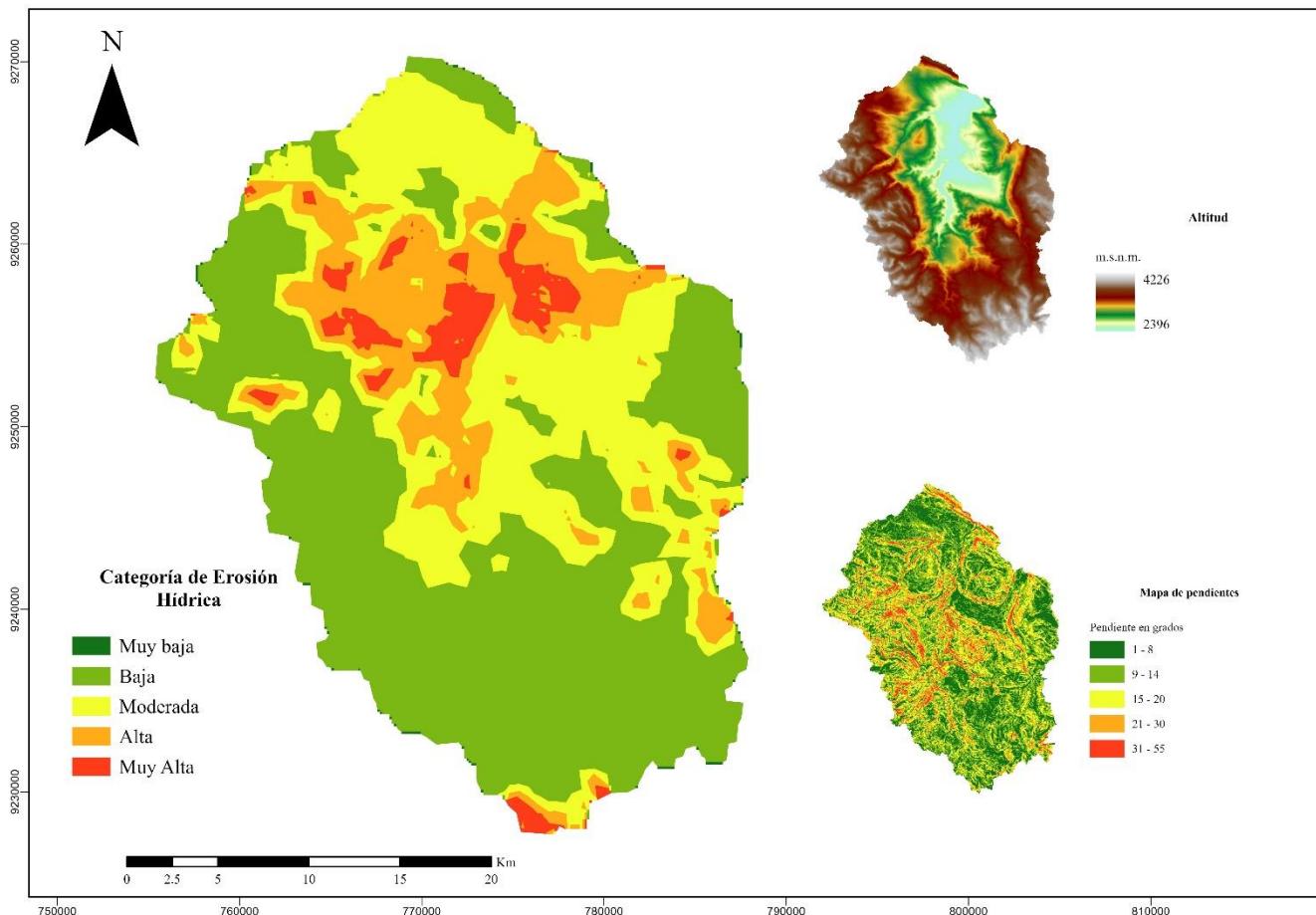


Fig. 10 mapa de susceptibilidad a erosión hídrica.

III. DISCUSIONES

La aplicación del modelo USLE (Ecuación Universal de Pérdida del suelo) es un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha demostrado ser una herramienta robusta y eficaz para la estimación y mapeo de la pérdida de suelo por desgaste hídrico, como se ha evidenciado en la cuenca del río Llaucano. Esta metodología es ampliamente reconocida por su capacidad para integrar factores biofísicos y antrópicos en un análisis espacial detallado [2], [22], [23]. La facilidad de vincular algoritmos de cálculo con software GIS permite la asignación precisa de valores para los factores K, C y P, optimizando el análisis en paisajes complejos [18].

Los resultados obtenidos en la zona de captación fluvial del río Llaucano revelan una heterogeneidad en la susceptibilidad a la erosión, con valores de pérdida de suelo anual que oscilan entre 1.01 y 5 t/ha/año. Este rango es comparable con estudios similares realizados en otras cuencas peruanas o andinas. Por ejemplo, que muestran variaciones significativas según la topografía y el uso del suelo, lo cual se observa en nuestros resultados para la pérdida de suelo. Asimismo, [24], en la subcuenca del río Angasmarca (La Libertad), una zona

geográficamente cercana y con características similares, también resalta la variabilidad del potencial de erosión hídrica influenciada por factores topográficos y de cobertura. En un contexto más amplio, estudios como el de [23], en la subcuenca del río Caplina (Tacna) también confirman la utilidad del USLE y GIS para identificar áreas vulnerables, aunque los valores específicos de erosión pueden variar debido a las condiciones climáticas y edáficas particulares de cada región.

El análisis de los factores individuales de la USLE en la cuenca del río Llaucano revela las causas de la variabilidad en la erosión: el Factor R, constante en 625, indica un potencial erosivo significativo. El Factor K, con un promedio de 0.27 (rango 0.01-0.31), muestra una susceptibilidad moderada, ligada a propiedades como textura y drenaje. El Factor LS es crítico, con valores de 0.01^a 2.43, donde las pendientes pronunciadas aumentan drásticamente el arrastre de sedimentos, destacando la importancia de los SIG para su cálculo preciso [18]. El Factor C con valores de 0 y 1, demuestra que la densa vegetación ofrece alta protección (valores bajos), mientras que las zonas urbanas, mineras y agrícolas (valores altos) son puntos de máxima exposición; la asignación precisa

de este factor se beneficia de los SIG y la teledetección [25], aunque los cambios de uso y la inercia pueden influir en las tasas de erosión [2], [26]. Finalmente, el Factor P, con valores que varían de 0 a 1, indica que las prácticas efectivas reducen la erosión, mientras que su ausencia o ineficacia en áreas agrícolas y urbanas aumenta la susceptibilidad.

Los incendios forestales son un grave problema en regiones altoandinas, como la cuenca estudiada, ya que al desbastar la cobertura vegetal, exponen el suelo a la erosión hídrica, aumentando drásticamente el Factor C. Estudios como el de [5], confirman cómo los incendios reducen la vegetación, impactando la protección del suelo, lo que resalta la necesidad de considerarlos en la planificación de cuencas. La categorización de la susceptibilidad en la cuenca del río Llaucano es clave para la gestión territorial: el 50.28% con baja susceptibilidad ofrece una oportunidad para la conservación preventiva; el 29.92% con susceptibilidad moderada exige atención prioritaria; y el 20.56% con alta y muy alta susceptibilidad, representa puntos calientes que requieren intervenciones urgentes para mitigar la significativa pérdida de suelo. El análisis USLE – SIG cuantifica la pérdida de suelo y, junto con la consideración de factores como los incendios, provee una base sólida para gestores y autoridades prioricen recursos y diseñen estrategias de manejo que fomenten la resiliencia del paisaje.

En conclusión, en el contexto local, las estrategias deben implementarse mediante prácticas agrícolas sostenibles (rotación de cultivos, curvas de nivel, sistemas agroforestales), obras físicas de conservación (terrazas, Zanjas de infiltración) y gestiones comunitarias para reforestación y control de incendios. Como trabajos futuros, se sugiere replicar la metodología USLE-SIG en otras cuencas andinas, realizar un análisis de sensibilidad de los factores R, K, LS, C y P para identificar los más influyentes, e incorporar enfoques de analítica avanzada e inteligencia artificial para mejorar la predicción de escenarios de erosión.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio reafirma que la aplicación del modelo USLE, integrada con análisis multicriterio y Sistemas de Información Geográfica (SIG), es una metodología eficaz para la evaluación detallada de la susceptibilidad a la erosión hídrica en cuencas complejas como la del río Llaucano, Cajamarca. Los resultados cuantificaron una pérdida de suelo anual entre 1.01 y 5 t/ha/año, revelando una distribución espacial heterogénea de la vulnerabilidad, si bien el 50.28% de la cuenca presenta baja susceptibilidad, el 29.92% muestra una susceptibilidad moderada, y un crítico 20.56% se clasifica en categorías de alta y muy alta susceptibilidad. Esta variabilidad está intrínsecamente ligada a la interacción de factores clave como la topografía, la cobertura vegetal y la ausencia o ineficacia de prácticas de conservación. Además, se identifica a los incendios forestales como un factor extremo agravante, que elimina cubierta vegetal, incrementando drásticamente exposición del

suelo y su vulnerabilidad a la erosión, como lo demuestran estudios en la región [5].

Para reducir la susceptibilidad a la erosión en la cuenca, es esencial una gestión territorial integrada que incluya prácticas agrícolas sostenibles, medidas estructurales como terrazas, reforestación con especies nativas, y la participación comunitaria. También es crucial implementar sistemas de alerta temprana y planes de manejo para incendios forestales. Este estudio es altamente relevante, sirviendo como modelo metodológico replicable para otras cuencas andinas y proporcionando información espacial clave para la planificación de recursos y prevención de desastres.

REFERENCIAS

- [1] “Impactos negativos de la erosión hídrica mediante el aporte de sedimentos en la cuenca alta del río moche, la libertad, 2020”, *Ciencia Latina*, vol. 5, núm. 6, pp. 12506–12531, dic. 2021, doi: 10.37811/cl_rcm.v5i6.1267.
- [2] Y. Abadín Pérez, “Aplicación de un sistema de información geográfica (SIG) al análisis evolutivo de la erosión de suelos como consecuencia de los cambios de uso en la isla de Gran Canaria”, *Vector Plus. Las Palmas de Gran Canaria: Fundación Universitaria, 1994- ISSN 1134-5306, n.29, 2007, p. 68*, 2007, Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://accedacris.ulpgc.es/jspui/handle/10553/6659>
- [3] A. M. Camarasa Belmonte, A. Bescós Atíñ, y J. R. Sancho Úbeda, “Evaluación del riesgo de erosión en relación con la dinámica ocupacional del suelo a partir de Sistemas de Información Geográfica”, 1998, Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10550/39882>
- [4] M. J. Muñoz y B. Monasterio, “INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL EN LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL: UN ESTUDIO EXPERIMENTAL”, vol. 9, 2024.
- [5] E. Gastolomendo Malimba, H. Díaz Rimarachín, y G. S. Licaparedolfo, “Reconstructing Ecosystems: Analysis of the Recolonization of Flora After the 2022 Fires in Pampa Caballero, Granja Porcon, Cajamarca”, en *Proceedings of the 4th LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2024): “Creating solutions for a sustainable future: technology-based entrepreneurship”*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2024. doi: 10.18687/LEIRD2024.1.1.736.
- [6] J. Santos Mendoza y D. M. Ortega Suárez, “Evaluación de las principales causas de la erosión del suelo, pérdida de la biodiversidad en el municipio Bucaramanga con la aplicación de sistema de información geográfica”, Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/59379>
- [7] L. N. Saavedra Mejía, “Caracterización fisicoquímica y biológica de la calidad del agua en el río Llaucano de la ciudad de Bambamarca”, *Universidad Nacional de Cajamarca*, 2019, doi: 10/S27-T.
- [8] A. R. Goicochea Cueva, “Determinación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del Río Chonta – Cajamarca”, *Universidad Nacional de Cajamarca*, oct. 2024, Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/7961>
- [9] J. E. Pardo Pinedo, “Modelamiento geoespacial para la identificación de zonas críticas vulnerables a peligros múltiples, Distrito de Huabal - Jaén – Cajamarca”, *Universidad Nacional de Cajamarca*, 2022, Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/5353>
- [10] A. N. del A. A. A. del A. Marañón, “III monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Llaucano: Informe técnico”, *Autoridad Nacional del Agua*, 2015, Consultado: el 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2547>

- [11] “(PDF) Métodos empíricos de la investigación”, *ResearchGate*, doi: 10.29057/esh.v9i17.6701.
- [12] “Ecación Universal de Pérdida de Suelo | Tierra y Agua | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura | Tierra y Agua | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura”. Consultado: el 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1236441/>
- [13] A. M. D. Cruz, M. C. Maniquiz-Redillas, R. M. Tanhueco, y M. P. De Leon, “Estimation of the Rainfall Erosivity Factor (R-Factor) for Application in Soil Loss Models”, *Water*, vol. 17, núm. 6, Art. núm. 6, ene. 2025, doi: 10.3390/w17060837.
- [14] “Subsistema físico | Gobierno Regional Cajamarca”. Consultado: el 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://zeot.regioncajamarca.gob.pe/medio-fisico>
- [15] I.-Y. Rengifo-Rengifo, F.-A. Muñoz-Gomez, O.-A. Toro-Trochez, I.-Y. Rengifo-Rengifo, F.-A. Muñoz-Gomez, y O.-A. Toro-Trochez, “Modelo USLE para estimar la erosión hídrica en siete municipios de la zona andina colombiana”, *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 20, núm. 2, pp. 29–44, jul. 2022, doi: 10.18684/rbsaa.v20.n2.2022.1738.
- [16] “Mapoteca Virtual | Gobierno Regional Cajamarca”. Consultado: el 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://zeot.regioncajamarca.gob.pe/node/588>
- [17] “Evaluación de los recursos territoriales agroecológicos para la planificación del desarrollo agrícola: un estudio de caso de Kenia - Anexo técnico 2”. Consultado: el 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.fao.org/4/t0733e/T0733E05.htm?utm_source=chatgpt.com
- [18] “(PDF) A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units”, *ResearchGate*, Consultado: el 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/233425999_A_GIS_procedure_for Automatically_calculating_the_USLE_LS_factor_on_topographically_complex_landscape_units
- [19] Y. Valenzuela, “Manual Conservación de Suelos”, ene. 2009, Consultado: el 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/74303346/Manual_Conservaci%C3%B3n_de_Suelos
- [20] H. A. Pacheco, R. X. Cevallos, y C. J. Vinces, “Cálculo del factor C de la RUSLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo-Venezuela usando imágenes del Satélite Miranda VRSS-1”, *Revista ESPACIOS*, vol. 40, núm. 03, ene. 2019, Consultado: el 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaespacios.com/a19v40n03/19400306.html>
- [21] A. Khan, A. Rahman, y S. Mahmood, “Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE model in District Swat, Eastern Hindu Kush, Pakistan”, *Journal of Water and Climate Change*, vol. 14, núm. 6, pp. 1881–1899, jun. 2023, doi: 10.2166/wcc.2023.495.
- [22] J. J. Jaramillo-Véliz, “Diagnóstico de la erosión hídrica del suelo aplicando modelo U.S.L.E mediante herramientas SIG Diagnosis of soil water erosion applying the U.S.L.E model using GIS tolos”, vol. 6, núm. 4, 2021.
- [23] J. M. Calderón Cárdenas y S. D. del P. Vizcarra Soto, “Evaluación de la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina utilizando el modelo USLE mediante el Sistema de Información Geográfico, Tacna-2023”, 2024, Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/3551>
- [24] J. D. R, “Diagnóstico del potencial de erosión hídrica mediante técnicas de geoprosesamiento en la sub-cuenca del río Angamarca, La Libertad, Perú”, *Anales Científicos*, vol. 76, núm. 2, Art. núm. 2, dic. 2015, doi: 10.21704/ac.v76i2.793.
- [25] Á. L. Flores Villanueva, “Aproximación de riesgo por erosión hídrica aplicando un sistema de información geográfica en la subcuenca shambillo, distrito de Padre Abad”, 2015, Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1477>
- [26] R. Ramos-Reyes, D. J. Palma-López, C. A. Ortiz-Solorio, C. F. Ortiz-García, y G. Díaz-Padilla, “Cambios de uso de suelo mediante técnicas de sistemas de información geográfica en una región cacaotera”, *Terra Latinoamericana*, vol. 22, núm. 3, pp. 267–278, 2004.