

DOI: <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n1.360>

## *Estimación de la erosión hídrica mediante el modelo RUSLE en la cuenca Yanango, Chanchamayo - Perú*

Juriko Soiffa Vicente Cisinaro

[jsvicentecisinaro@gmail.com](mailto:jsvicentecisinaro@gmail.com)<https://orcid.org/0009-0009-9404-5800>Universidad Nacional Agraria la Molina  
Perú

Gonzalo Ramces Fano Miranda

[gfano16@gmail.com](mailto:gfano16@gmail.com)<https://orcid.org/0000-0002-4401-8654>Universidad Nacional Agraria la Molina  
Perú

### RESUMEN

Se evaluó la erosión hídrica en la cuenca Yanango, ubicada en el distrito de La Merced, provincia de Chanchamayo, Perú, mediante la aplicación del modelo *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) integrado con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El objetivo fue cuantificar las tasas de erosión y determinar las áreas críticas susceptibles a degradación. Los factores de RUSLE (R, K, LS, C y P) se obtuvieron a partir de datos de campo, análisis topográfico e información satelital. Los resultados obtenidos indican una tasa de erosión hídrica promedio de 3.16 t/ha/año para la totalidad de la cuenca, con valores por subcuencas que oscilan entre 1.11 t/ha/año y 3.16 t/ha/año, lo que clasifica el nivel de erosión general como moderado. Los hallazgos muestran que las subcuencas ubicadas aguas abajo, especialmente en las proximidades del Túnel Yanango, presentan las mayores tasas de pérdida de suelo debido a la combinación de pendientes pronunciadas, escasa cobertura vegetal y elevada pluviosidad. Estos resultados subrayan la necesidad de implementar medidas de conservación y restauración de suelos en las zonas prioritarias, con el fin de reducir los riesgos de erosión y fortalecer la gestión sostenible de la cuenca Yanango.

**Palabras clave:** RUSLE, erosión hídrica, SIG, gestión de cuencas, cuenca Yanango



## *Estimation of Water Erosion Using the RUSLE Model in the Yanango Basin, Chanchamayo – Perú*

### **ABSTRACT**

Soil erosion was evaluated in the Yanango Basin, located in the district of La Merced, Province of Chanchamayo, Peru, using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model integrated with Geographic Information Systems (GIS). The objective was to quantify erosion rates and identify critical areas susceptible to degradation. The RUSLE factors (R, K, LS, C, and P) were derived from field data, topographic analysis, and satellite information. The results indicate an average water erosion rate of 3.16 t/ha/year for the entire watershed, with sub-watershed values ranging between 1.11 t/ha/year and 3.16 t/ha/year, classifying the overall erosion level as moderate. The findings show that the downstream sub-watersheds, especially in the vicinity of the Yanango Tunnel, exhibit the highest soil loss rates due to a combination of steep slopes, sparse vegetation cover, and high rainfall. These results underscore the need to implement soil conservation and restoration measures in priority areas to reduce erosion risks and strengthen the sustainable management of the Yanango watershed.

**Keywords:** RUSLE, soil erosion, GIS, watershed management, Yanango Basin



## INTRODUCCIÓN

La pérdida de suelos ocasionada por la erosión constituye uno de los problemas ambientales y socioeconómicos más significativos a nivel global, afectando la capacidad del suelo para retener agua y el desarrollo de los cultivos (FAO, 2019). Particularmente, la erosión hídrica es generada por la acción del agua en zonas de ladera y es de vital importancia para todo proyecto de ingeniería que se desarrolle sobre los ríos o quebradas. Este proceso se agrava en países en vías de desarrollo, como es el caso de Perú (Rosas, 2016), donde estudios previos han estimado que el 29.9% del área afectada por erosión hídrica se cataloga como moderada (INRENA, 2005). El estudio más reciente realizado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) en 2017, si bien aporta información relevante sobre las tasas de erosión a nivel nacional, subraya la necesidad de más información a escala de cuencas para un conocimiento y control más efectivos de la erosión y los procesos de sedimentación. El objeto de estudio de este artículo es la Cuenca Yanango, ubicada en la Selva Alta (Chanchamayo, Junín), un área crítica debido al historial de riesgo asociado con la movilización de sedimentos. El problema de investigación reside en la carencia de una cuantificación rigurosa de la magnitud de la erosión hídrica en esta cuenca, un conocimiento esencial dado que el riesgo de avenidas y huaicos pone en peligro la infraestructura vial y las poblaciones adyacentes. Este riesgo se materializó históricamente con el colapso del puente atirantado Yanango en el año 2005, un evento exacerbado por la continua depositación de grandes cantidades de sólidos provenientes de quebradas afluentes como Umanpaccha. Para abordar la cuantificación de la pérdida de suelo, se utiliza la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), un modelo empírico que permite estimar la tasa de erosión hídrica a través de la interacción de cinco factores fundamentales (R, K, LS, C y P). La aplicación de RUSLE requiere la determinación rigurosa de cada factor mediante la integración de información satelital, cartográfica, herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos de campo. Antecedentes como las publicaciones de SENAMHI (2017) y los lineamientos de Vásquez et al. (2016) sobre la necesidad de considerar la geomorfología de la cuenca y la sedimentación para la prevención y control de la erosión en infraestructura vial, refuerzan la pertinencia de este enfoque a escala local. Esta investigación contribuye al conocimiento científico al aplicar y calibrar RUSLE a la



escala detallada de las subcuencas de Yanango, identificando las zonas de mayor vulnerabilidad topográfica y de uso de suelo. La justificación de este estudio radica en que la estimación de las tasas de erosión e identificación de las zonas vulnerables ayudará a mejorar la toma de decisiones en torno al planteamiento de estructuras y el manejo de los sedimentos en el río Yanango. En este contexto, el objetivo general de este artículo es determinar la tasa de erosión hídrica en la cuenca del río Yanango mediante la aplicación de la metodología RUSLE. Para lograr este propósito, los objetivos específicos son: determinar los Factores RUSLE para estimar la tasa de erosión en la cuenca Yanango y evaluar la distribución espacial de la erosión en la cuenca Yanango.

## **METODOLOGÍA**

### **Enfoque, Tipo y Diseño de Investigación**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de carácter aplicativo y descriptivo. El componente aplicativo consistió en la integración de la metodología RUSLE y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para desarrollar una herramienta de diagnóstico del riesgo de erosión hídrica en la cuenca Yanango (Vásquez et al., 2016).

El diseño es no experimental y de corte transversal, debido a que el análisis se fundamentó en datos históricos y contemporáneos recolectados en un periodo único, sin manipulación de variables.

### **Detalles del Área de Estudio**

- Población: Cuenca Hidrográfica del Río Yanango (47.92 km<sup>2</sup>).
- Unidad de análisis espacial: Píxel ráster de 30 x 30 metros, derivado de un Modelo Digital de Elevación (DEM).

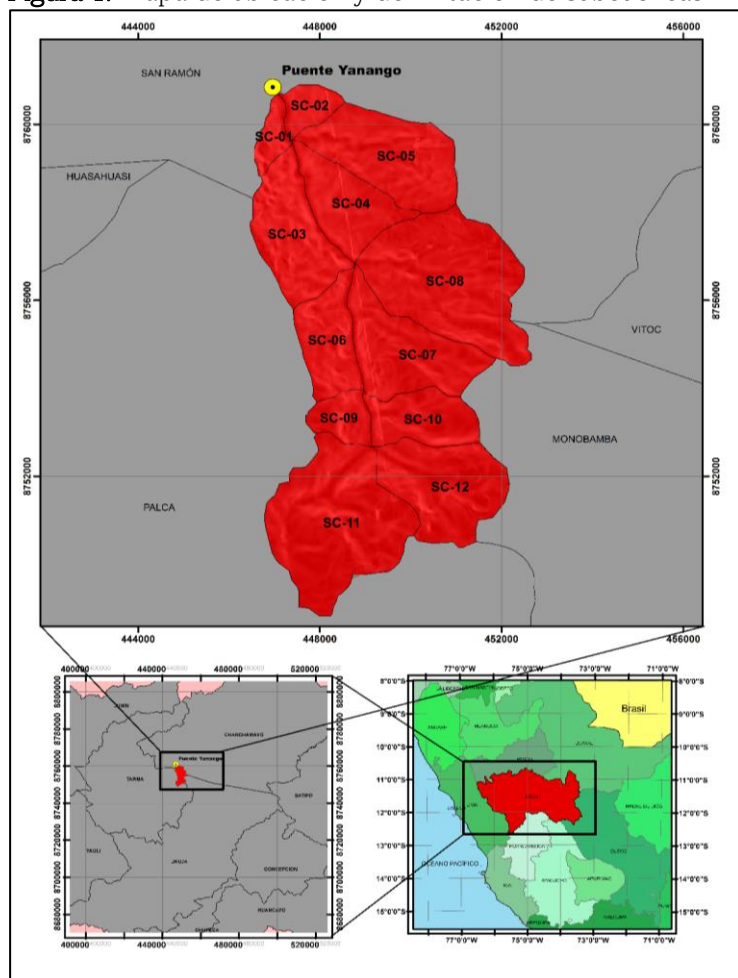
En la



Figura 1 se muestra el mapa de ubicación y delimitación de subcuencas.



**Figura 1:** Mapa de ubicación y delimitación de subcuencas



## Materiales y Recolección de Datos

La metodología de recolección de datos para el modelo RUSLE se estructuró en dos fases: gabinete y campo. La fase de gabinete consistió en la recopilación de información de fuentes oficiales y de teledetección. Se obtuvieron datos climáticos (precipitación máxima en 24 horas y mensual), basados en registros de seis estaciones (dos pluviométricas y cuatro convencionales). La información cartográfica y topográfica incluyó imágenes satelitales Landsat 8 y el Modelo Digital de Elevación (DEM) S18W072 del MINAM, complementados con la Declaración del Mapa Digital de Suelos del Mundo (DMSW) de la FAO (2023).

La fase de campo, desarrollada del 25 al 30 de noviembre de 2022, se centró en la observación directa de las condiciones del área y la verificación de prácticas de conservación. Durante esta, se recolectaron tres muestras de suelo representativas (mediante calicatas de 1.0 m de profundidad) para su análisis granulométrico en laboratorio (métodos mecánicos e hidrómetro), información esencial para la

determinación del Factor K. Finalmente, el procesamiento de la información espacial se efectuó mediante el software QGis 3.28.

### Modelo RUSLE

El modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) fue formulado por Renard et al. (1996) para estimar la pérdida de suelos, siendo una versión mejorada del modelo USLE (Universal Soil Loss Equation) que fue presentada por Wischmeier y Smith (1962) para ser publicada en el “Manual del Departamento de Agricultura” de los Estados Unidos.

La metodología RUSLE fue desarrollada para superar algunas de las limitaciones de USLE (FAO,2021).

Sus avances incluyen:

- Computarización de algoritmos para facilitar los cálculos.
- Desarrollo de un término de susceptibilidad del suelo a la erosión estacionalmente variable (K)
- Un nuevo método para calcular el factor cubierta-manejo (C), utilizando sub-factores que incluyen uso previo de la tierra, cubierta de cultivos, cubierta vegetal del suelo (incluyendo fragmentos de roca en la superficie), y rugosidad del terreno.
- Nuevas formas de estimar los factores de largo y magnitud de la pendiente (LS) que consideran porcentajes de erosión en surcos e inter-surcos. La capacidad de ajustar el LS para pendientes de forma variable; y
- Nuevos valores de prácticas de conservación (P) para cultivo en fajas alternadas, uso de drenaje subterráneo, y praderas.

El modelo matemático de RUSLE utilizado es:

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

Donde:

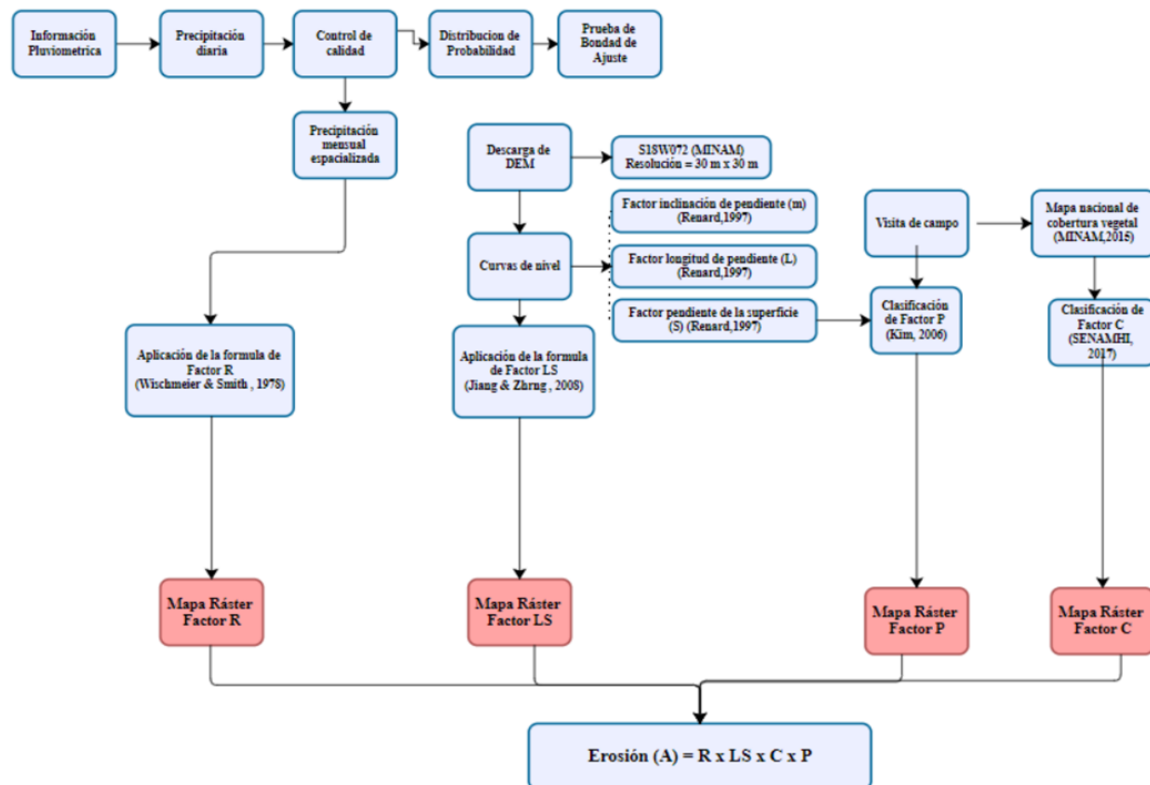
- A: es el cálculo del promedio espacial y temporal de la pérdida de suelo por unidad de área ( $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ), expresadas en las unidades seleccionadas para el factor K y para el periodo seleccionado del factor R.
- R: es el Factor de Erosividad ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) de lluvia.



- K: Factor de Erodabilidad ( $\text{ton} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) del suelo, es la tasa de pérdida de suelo por unidad del índice de erosión para un suelo determinado.

En la Figura 2 se muestra el diagrama del flujo metodológico empleado.

**Figura 2:** Diagrama de flujo metodológico RUSLE



### Factor de Erosividad de la Lluvia (R)

Según Wischmeier y Smith, el factor de erosividad (R) es un índice numérico que expresa la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo. Este factor representa el potencial de la precipitación o la agresividad de la erosividad de la lluvia, en función de características físicas como la intensidad, duración, velocidad y tamaño de las gotas. Ramírez señala que existe una relación directa entre la erosividad y la precipitación anual.

En la versión original de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), el factor R se calcula como la suma promedio anual de la erosividad de tormentas individuales, obtenida a partir del producto entre la energía total de la tormenta y la intensidad máxima en 30 minutos. No obstante, el Perú no cuenta con registros de intensidad de lluvia (mm/h) que permitan aplicar este método de manera



directa. Sin embargo, la ecuación desarrollada por Wischmeier y Smith permite calcular el factor R en ausencia de dichos registros.

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10 \left( 1.5 \log 10 \left( \frac{p_i^2}{p} \right) - 0.08188 \right) \quad (2)$$

Donde R, el Factor Erosividad de lluvias está en MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; Pi es la precipitación mensual que está en mm y p la precipitación anual en mm.

### **Factor de Erodabilidad (K)**

Las propiedades del suelo, como la textura, granulometría, porosidad, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica y porcentaje de arcilla influyen directamente en el factor de erodabilidad (K). Este factor mide la susceptibilidad del suelo al desprendimiento, es decir, la resistencia natural que ofrece frente a la erosión.

Gonzáles del Tánago comprobó experimentalmente que los suelos más erosionables corresponden a texturas intermedias con mayor porcentaje de limo. En contraste, los suelos con más del 30% de arcilla presentan baja erodabilidad, debido a que el aumento de partículas finas incrementa la cohesión y, por ende, la resistencia a la erosión.

En la

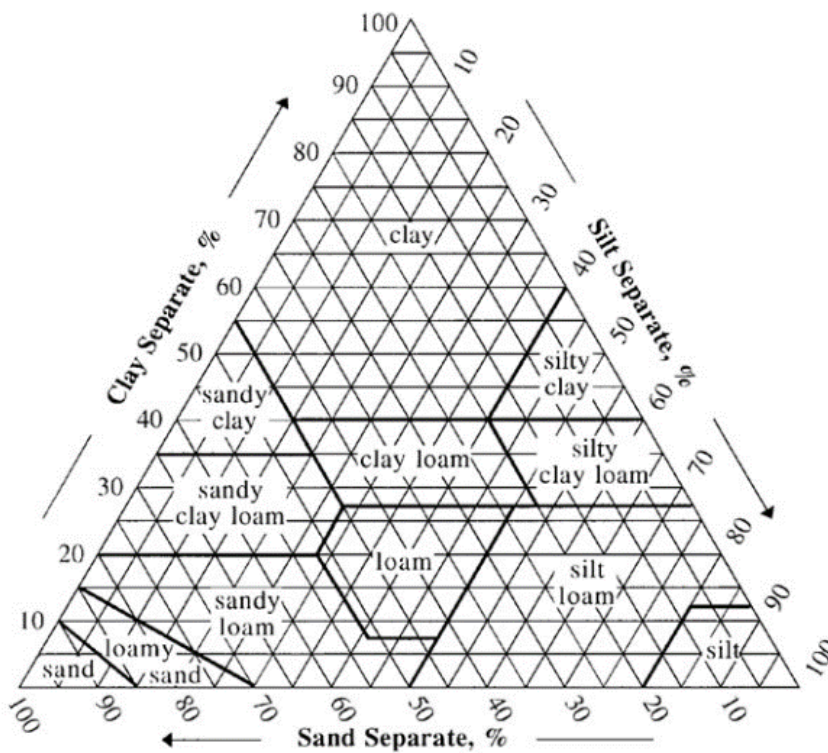


Figura 3 se presenta el método del triángulo textural, basado en la clasificación del USDA según el tamaño de las partículas, la cual considera:

- Limo: partículas con un tamaño entre 0.002 y 0.05 mm.
- Arcilla: partículas menores a 0.002 mm.



**Figura 3:** Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de partículas



Fuente: United States Department of Agriculture (USDA)

El factor K, la erosionabilidad del suelo fue establecida originalmente al determinar las pérdidas de suelo en parcelas de erosión típicas (22.1 m de longitud, 9% de pendiente) y dividir este valor con el de energía erosiva de la lluvia (R) que les dio origen. La ecuación para obtener el factor K es:

$$100K = 0.01317 \times (2.1 \times M^{1.14} \times 10^{-4} \times (12 - a) + 3.25 \times (b - 2) + 2.5 \times (c - 3)) \quad (3)$$

Donde:

- M: (%Arena muy fina y limo) x (100-%Arcilla)
- a: porcentaje de materia orgánica (%)
- b: Código de tipo de estructura
- c: Código de tipo de permeabilidad

Además, se han diseñado monogramas de uso frecuente que resuelve la ecuación anterior dentro de ciertos límites de valores. En la Tabla 1 se presenta las clases de permeabilidad según textura, mientras

que en la Tabla 2 se presenta los parámetros de estructura del suelo a profundidades de 15 a 18 cm superficiales.

**Tabla 1:** Clase de permeabilidad según textura

| Clase de permeabilidad  | USDA (1983)                              | Rawis et al. (1982)        | Hudson (1982)              |
|-------------------------|------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                         | Textura                                  | Kfs (m día <sup>-1</sup> ) | Kfs (m día <sup>-1</sup> ) |
| 1 (rápida y muy rápida) | Arenosa                                  | > 1.463                    | >3                         |
| 2 (moderada a rápida)   | Arenosa franca, franco arenoso           | 0.488 - 1.463              | 1.5 - 3                    |
| 3 (moderada)            | Franca, franco limoso, limosa            | 0.122 - 0.488              | 0.48 - 1.5                 |
| 4 (lenta a moderada)    | Franco arcillo arenoso, franco arcilloso | 0.049 - 0.122              | 0.12 - 0.48                |
| 5 (lenta)               | Franco arcillo limosa, arcillo arenosa   | 0.024 - 0.049              | 0.03 - 0.120               |
| 6 (muy lenta)           | Arcillo limosa                           | <0.024                     | <0.03                      |

Fuente: USDA (1983)

**Tabla 2:** Parámetros de estructura del suelo a profundidades de 15 a 18 cm superficiales

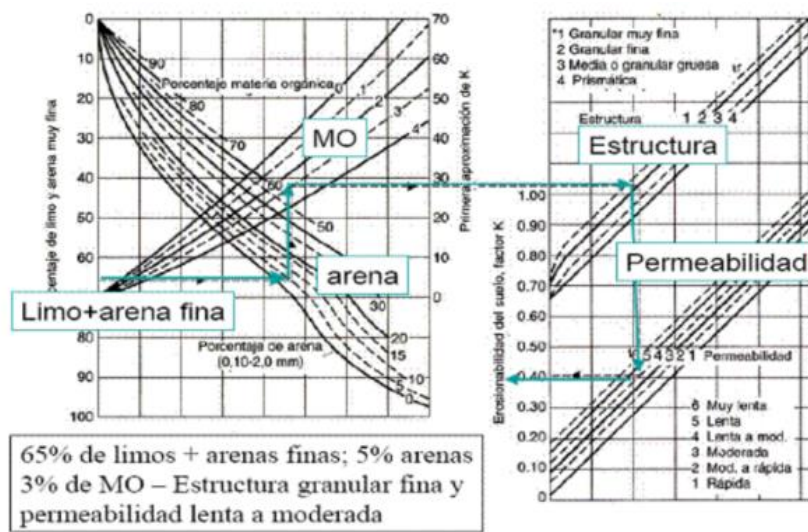
| Clase de estructura | USDA (1983)                                                         |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1                   | Granular y migajosa muy fina (< 1 mm)                               |
| 2                   | Granular y migajosa fina (1 - 2 mm)                                 |
| 3                   | Granular y migajosa media (2 - 5 mm) y granular grosera (5 - 10 mm) |
| 4                   | Granular y prismática muy grosera y columnar (> 10 mm)              |

Fuente: USDA (1983)

Para la determinación del factor de erodabilidad del suelo (K), se empleó el Nomograma de Wischmeier, tal como se ilustra en la Figura 4. Este procedimiento permite integrar variables físicas como el porcentaje de limos, arenas finas, materia orgánica y la estructura del suelo para obtener un valor preciso de susceptibilidad a la erosión.



**Figura 4:** Nomograma de Erodabilidad para determinar el valor de K



Fuente: United States Department of Agriculture (USDA)

La ecuación utilizada por Wischmeier y Smith considera la humedad y el estado de la superficie del suelo en el momento de las lluvias, teniendo un rango de variación estacional a lo largo del año. Experimentalmente se comprueba que los suelos más erosionables corresponden a texturas intermedias (fracción de limos más abundante), considerando que los suelos con un porcentaje de arcillas superior al 30 % son poco erosionables.

$$K_{USLE} = f_{csand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand} \quad (4)$$

$$f_{csand} = (0.2 + 0.3 \times \exp(-0.256 \times m_s \times (1 - (\frac{m_{silt}}{100})))) \quad (5)$$

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad (42)$$

$$f_{orgc} = 1 - \left( \frac{0.25 \times orgC}{orgC + \exp(3.72 - 2.95 \times orgC)} \right) \quad (6)$$

$$f_{hisand} = \left( \frac{0.7 \times (1 - (\frac{m_s}{100}))}{\left( 1 - (\frac{m_s}{100}) \right) + \exp(-5.51 + 22.9 \times (1 - (\frac{m_s}{100})))} \right) \quad (7)$$



Donde:

- $f_{csand}$ : valores de k bajos (suelos con alto contenido de arena gruesa y altos (suelos con poca arena.
- $f_{cl-si}$ : valores de k bajos (suelos con altas proporciones de arcilla a limo)
- $f_{org}$ : reduce k (suelos con alto contenido de carbono orgánico)
- $f_{hisand}$ : reduce k (suelos con contenido extremadamente altos de arena)

En la Tabla 3 se presenta la clasificación de los grados de Erodabilidad.

**Tabla 3:** Clasificación de los grados de Erodabilidad

| Valor de K (T ha.H / MJ mm ha.) | Clasificación           |
|---------------------------------|-------------------------|
| 0.007902                        | Muy poco erodable       |
| 0.0079-0.0171                   | Débilmente erodable     |
| 0.011-0.0342                    | Medianamente erodable   |
| 0.0342-0.0684                   | Fuertemente erodable    |
| 0.0684-0.1027                   | Extremadamente erodable |

Fuente: Amézquita (1990)

### Factor Topográfico (LS)

La longitud y pendiente de la ladera influyen generando tasas de erosión en el suelo, siendo el relieve uno de los factores que determina la producción de sedimentos de las cuencas. En las zonas más altas de la ladera se puede considerar como “zona sin erosión”, ocurriendo los fenómenos erosivos de mayor intensidad en la parte media y la sedimentación como proceso dominante en la parte baja de la cuenca. Siendo el factor de longitud (L) un valor adimensional, definido como el cociente en la tasa de erosión anual de una parcela con una longitud de ladera determinada; el factor de pendiente (S) se define como el cociente entre la tasa de erosión de una determinada parcela con pendiente (SENAMHI, 2017)

Estos son el factor de longitud (L) y el factor pendiente (S), la multiplicación de ambos factores genera el factor LS desarrollada por Jiang y Zheng (1998), se utilizará para calcular el factor LS en el presente estudio.

$$LS = 1.07 \left( \frac{\lambda}{20} \right)^{0.28} \left( \frac{a}{10^a} \right)^{1.45} \quad (3)$$



- $LS < 1$ : Este rango indica una topografía suave con pendientes bajas y cortas distancias de pendiente. Estas condiciones topográficas tienden a reducir el potencial de erosión del suelo.
- $1 < LS < 3$ : Estos valores indican una topografía moderada con pendientes de moderadas a pronunciadas y distancias de pendiente moderadas. En esta gama, el potencial de erosión del suelo puede ser moderado.
- $LS > 3$ : Este rango indica una topografía empinada con pendientes pronunciadas y largas distancias de pendiente. Estas condiciones topográficas aumentan significativamente el potencial de erosión del suelo, lo que resulta en una erosión más intensa.

### Factor de cobertura vegetal (C)

La cobertura vegetal actual como capa protectora entre la atmosfera y el suelo, los componentes aéreos como hojas y tallos absorben para de la precipitación logrando que su efecto sea menor si es que llega a alcanzar el suelo. El factor (C), es un factor combinado que refleja la influencia de la cobertura vegetal, tipos de cubierta vegetal y cantidad de aguaceros ocurridos durante los periodos que las inadecuadas prácticas agrícolas dejan desprotegido el suelo. (Cabrejos, 2016). En la Tabla 4 se puede apreciar los distintos valores para los diferentes tipos de cobertura vegetal.

**Tabla 4:** Factor C

| Tipo de Cobertura        | Descripción del Contenido                                          | Factor C |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------|
| Tierra cultivada         | Tierras utilizadas para la agricultura, horticultura y jardines.   | 0.63     |
| Bosque                   | Tierras cubiertas de árboles, con cubierta vegetal más del 30%.    | 0.003    |
| Pradera                  | Terrenos cubiertos de césped natural con una cubierta más del 10%. | 0.09     |
| Matorral                 | Tierras cubiertas de arbustos con una cubierta de más del 30%.     | 0.22     |
| Humedal                  | Tierras cubiertas de plantas de humedales y cuerpos de agua.       | 0        |
| Cuerpos de agua          | Las masas de agua en la superficie terrestre.                      | 0        |
| Tundra                   | Hierbas y arbustos en las regiones polares.                        | -        |
| Superficies artificiales | Tierras modificadas por las actividades humanas.                   | 0.09     |
| Tierras desoladas        | Tierras con cubierta vegetal inferior al 10%.                      | 0.5      |
| Nieve y hielo            | Tierras cubiertas por nieve permanente y capas de hielo.           | 0        |

Fuente: SENAMHI (2017)



## Factor de prácticas de conservación (P)

Este factor muestra la influencia que tiene las prácticas de conservación de los suelos sobre la tasa de erosión, consiste en disminuir la longitud del declive efectivo para la escorrentía (SENAMHI, 2017). Los valores de P varían entre 0 a 1. La determinación del factor P por efecto de incluir prácticas de conservación de suelos son obtenidos de valores de ensayos experimentales (CENEPRED, 2013). Según Kim (2006), este factor está relacionado con las prácticas de conservación sobre la tasa de erosión, donde mediante trabajos culturales o colocando cultivos siguiendo las curvas de nivel para formar fajas o terrazas que cortan las líneas de escorrentía. Es decir, consiste en disminuir la longitud del declive efectivo para la escorrentía. Los factores de prácticas de conservación están representados en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Factor de Prácticas de Conservación (P)

| Pendiente (%) | Contorno | Cultivo en fajas |
|---------------|----------|------------------|
| 0.0 - 7.0     | 0.55     | 0.27             |
| 7.0 - 11.30   | 0.6      | 0.3              |
| 11.30 - 17.60 | 0.8      | 0.4              |
| 17.60 - 26.80 | 0.9      | 0.45             |
| > 26.80       | 1        | 0.5              |

Fuente: Kim (2006)

$P = 0$ : Indica que no se ha implementado ninguna práctica de conservación del suelo. En este caso, se esperaría una alta erosión.

$0 < P < 0.5$ : Indica que se han implementado prácticas de conservación del suelo, pero su efectividad en la reducción de la erosión puede ser moderada. Es posible que se necesiten mejoras adicionales en las prácticas de conservación.

$0.5 \leq P < 1$ : Indica que se han implementado prácticas de conservación del suelo y están teniendo un efecto significativo en la reducción de la erosión. Cuanto más cercano esté P a 1, mayor será la efectividad de las prácticas de conservación.

$P = 1$ : Indica que se ha implementado una práctica de conservación altamente efectiva que está reduciendo la erosión de manera muy significativa. Se considera una práctica de conservación óptima.



## Limitaciones

La principal limitación metodológica es el carácter empírico del modelo RUSLE, que proporciona una estimación de la pérdida de suelo potencial promedio anual a largo plazo, sin simular la dinámica de eventos hidrológicos extremos. Adicionalmente, la topografía abrupta limitó la accesibilidad a ciertas zonas para la toma de muestras de suelo en campo

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de los Factores Determinantes del Modelo RUSLE

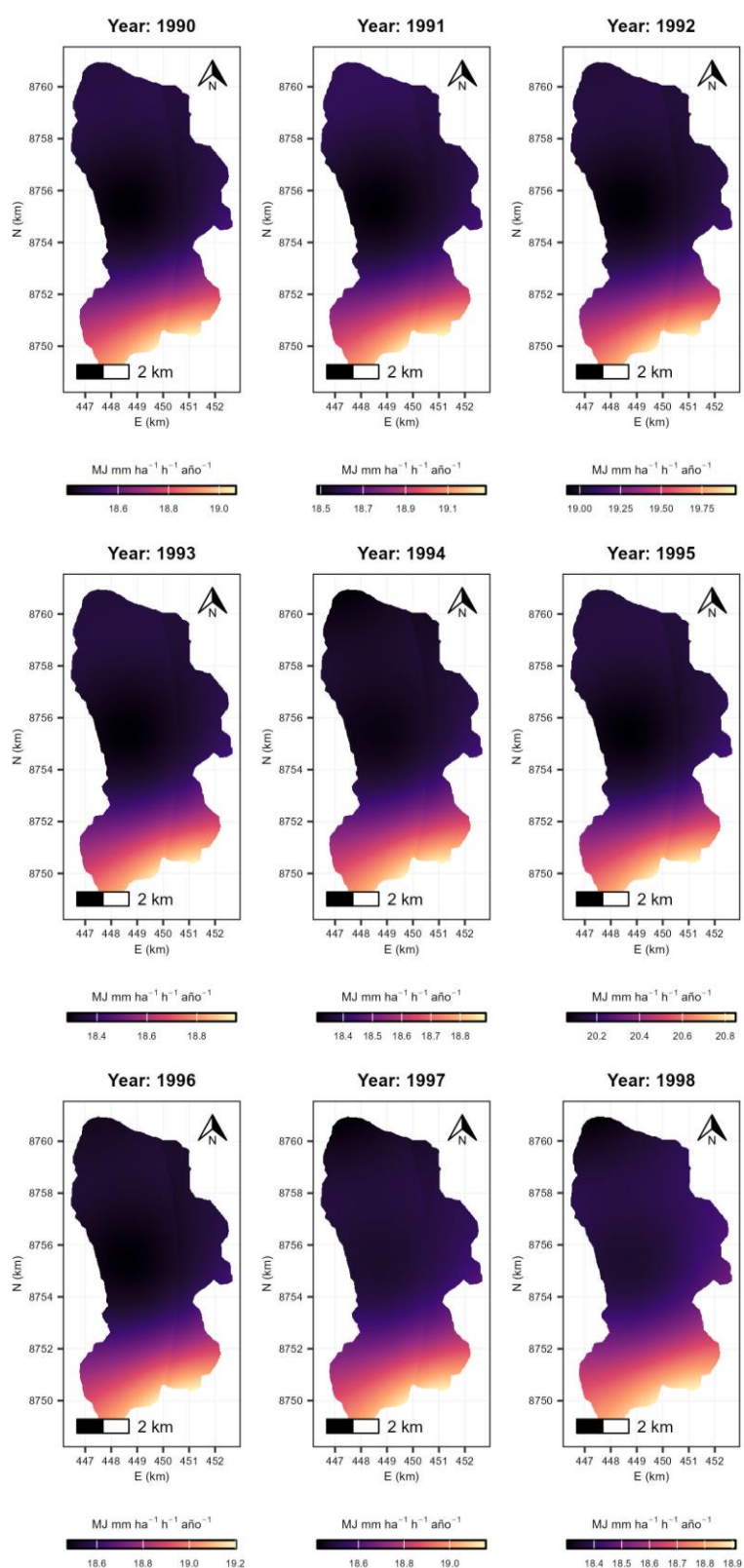
El análisis SIG permitió la espacialización de los cinco factores que controlan el proceso erosivo en la cuenca Yanango.

El Factor R (Ver Figura 5 a Figura 8) arrojó un valor promedio de  $17.346 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , indicando un potencial erosivo moderado pero constante en toda la cuenca. El Factor K (Figura 9), basado en el DMSW (FAO, 2023) y los análisis de campo, resultó en un valor uniforme de  $0.0184 \text{ Tn}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}/\text{MJ}\cdot\text{m}\cdot\text{ha}^2$ , clasificando los suelos como "Medianamente Erodables". Estos resultados sugieren que la variabilidad espacial de la erosión en la cuenca Yanango no es controlada por la agresividad climática ni por la edafología, sino por los factores topográficos y de manejo.

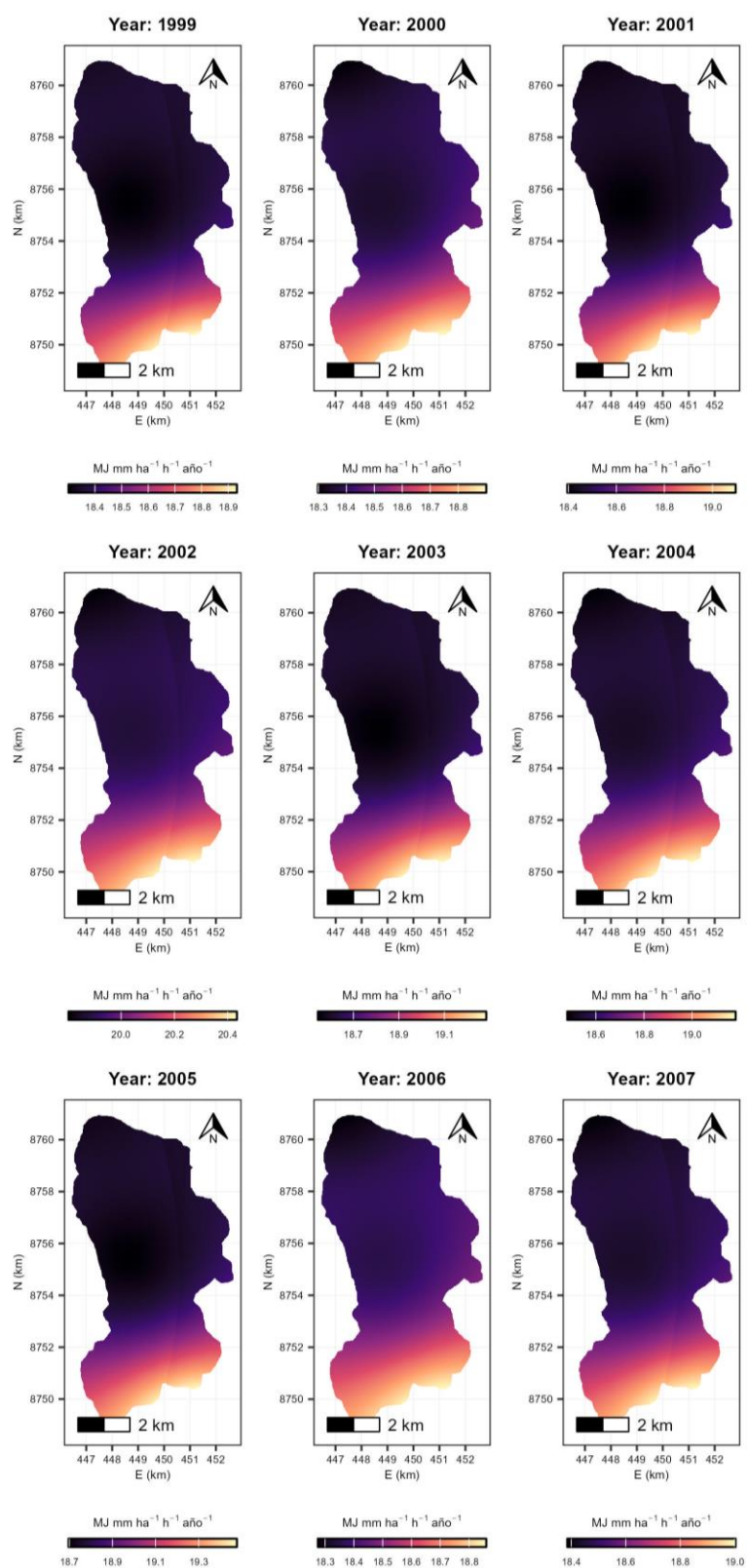
En contraste, los Factores LS y C demostraron ser los agentes determinantes. El Factor LS (Figura 10) presentó la mayor influencia, con un valor promedio de 15.12 y valores máximos de 17.63. Este valor, considerado alto, es consecuencia directa de las pendientes pronunciadas y las largas longitudes de ladera, confirmando que la geomorfología de la cuenca es un motor primario de la erosión. El Factor C (Figura 11) presentó la mayor variabilidad ligada al uso del suelo, con un promedio de 0.22. Los valores oscilaron drásticamente desde 0.06. Finalmente, el Factor P (Figura 12) arrojó un promedio de 0.52, indicando una efectividad moderada de las prácticas de siembra en contorno observadas.



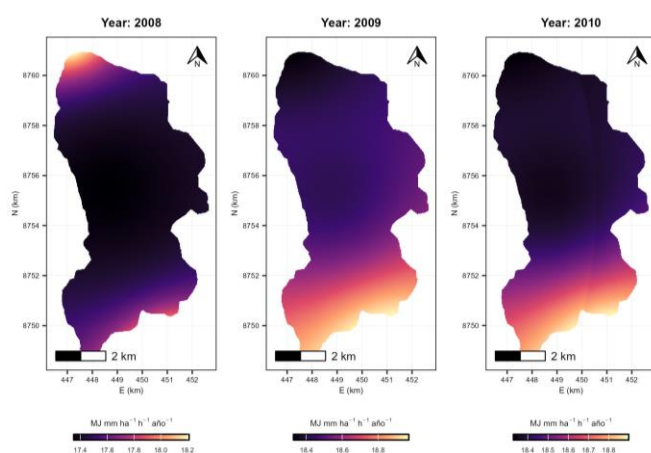
**Figura 5:** Distribución del Factor R en la cuenca Yanango – Parte 1



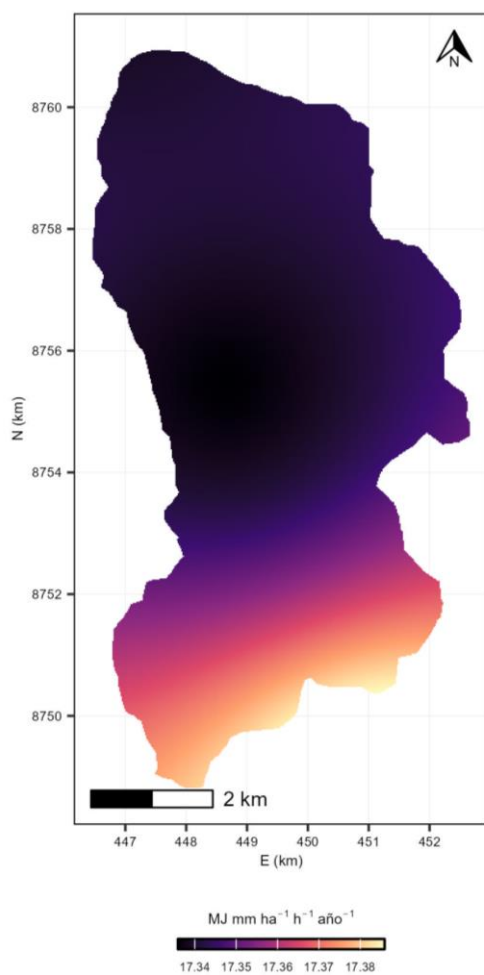
**Figura 6:** Distribución del Factor R en la cuenca Yanango – Parte 2



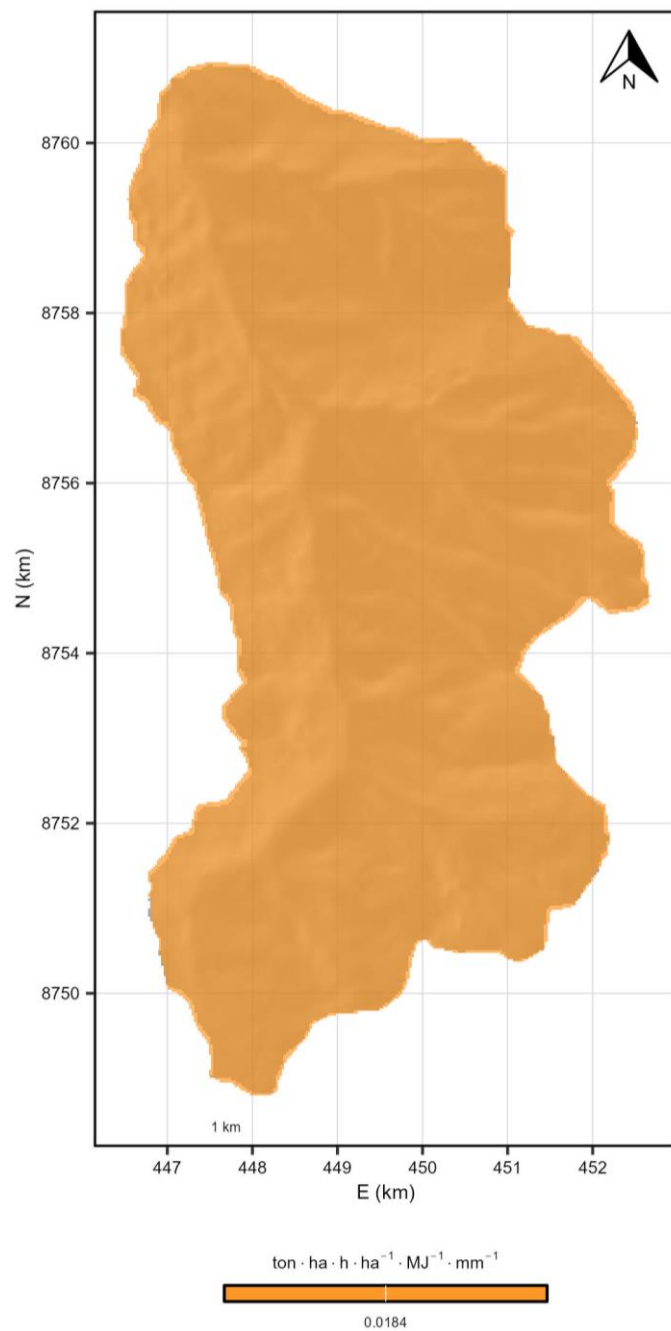
**Figura 7:** Distribución del Factor R en la cuenca Yanango – Parte 3



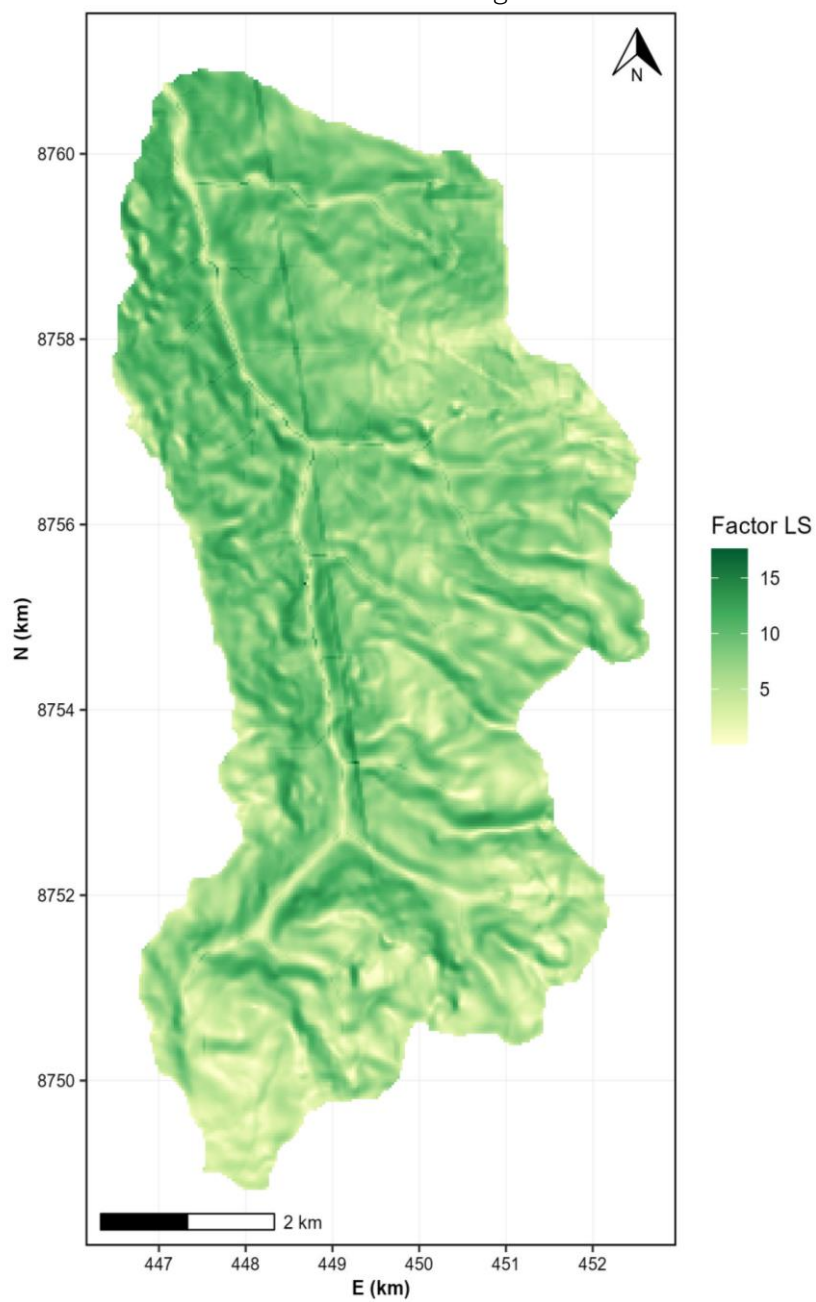
**Figura 8:** Distribución del Factor R en la cuenca Yanango – Promedio multianual



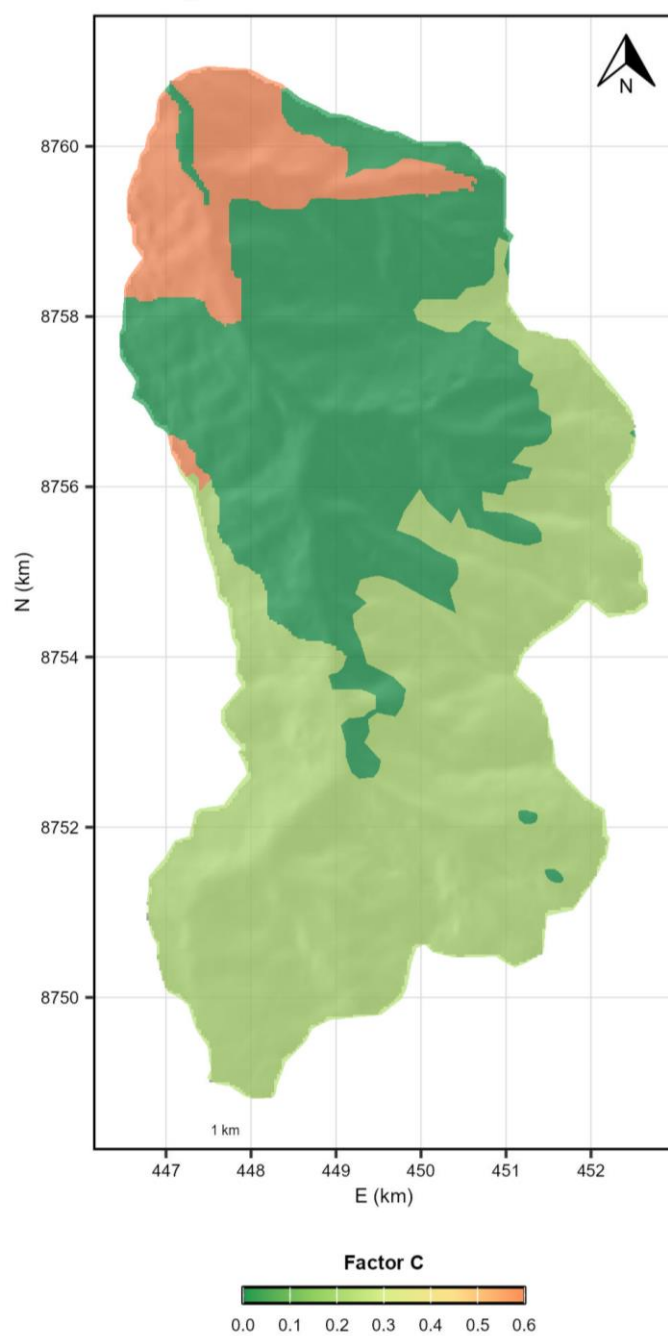
**Figura 9:** Distribución del Factor K en la cuenca Yanango



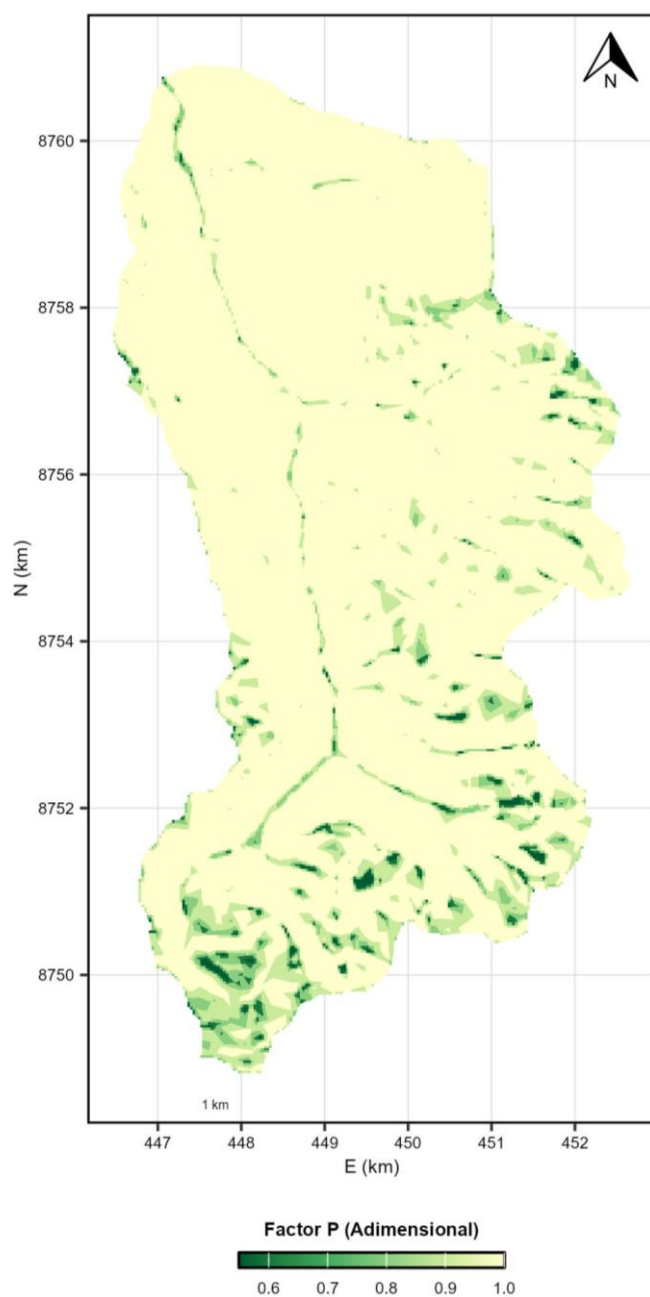
**Figura 10:** Distribución del Factor LS en la cuenca Yanango



**Figura 11:** Distribución del Factor C en la cuenca Yanango



**Figura 12:** Distribución del Factor P en la cuenca Yanango



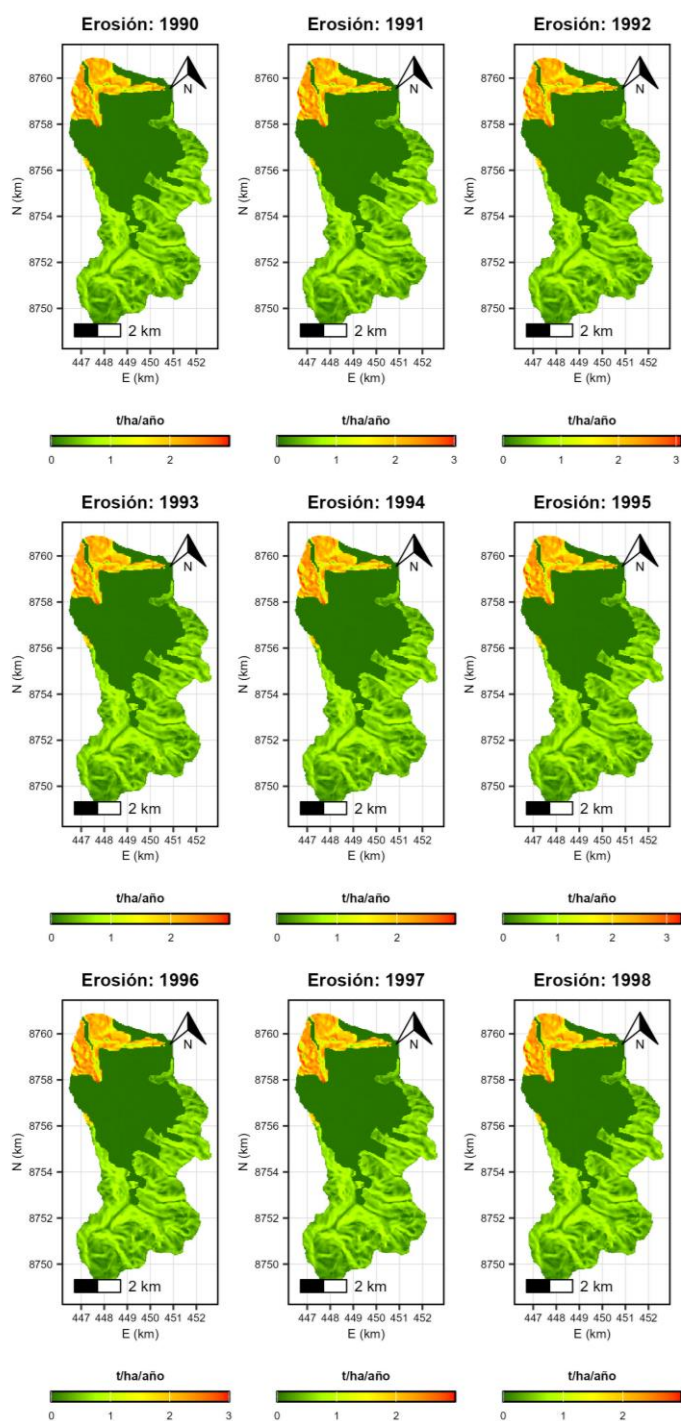
### Cuantificación y Espacialización de la Erosión Hídrica (A)

Tras la integración de los factores del modelo RUSLE (R, K, LS, C, P), se determinó que la tasa de erosión hídrica promedio en la cuenca Yanango presenta una variabilidad espacial significativa, influenciada directamente por la topografía accidentada y la cobertura vegetal. (Ver Figura 13 a Figura 16)

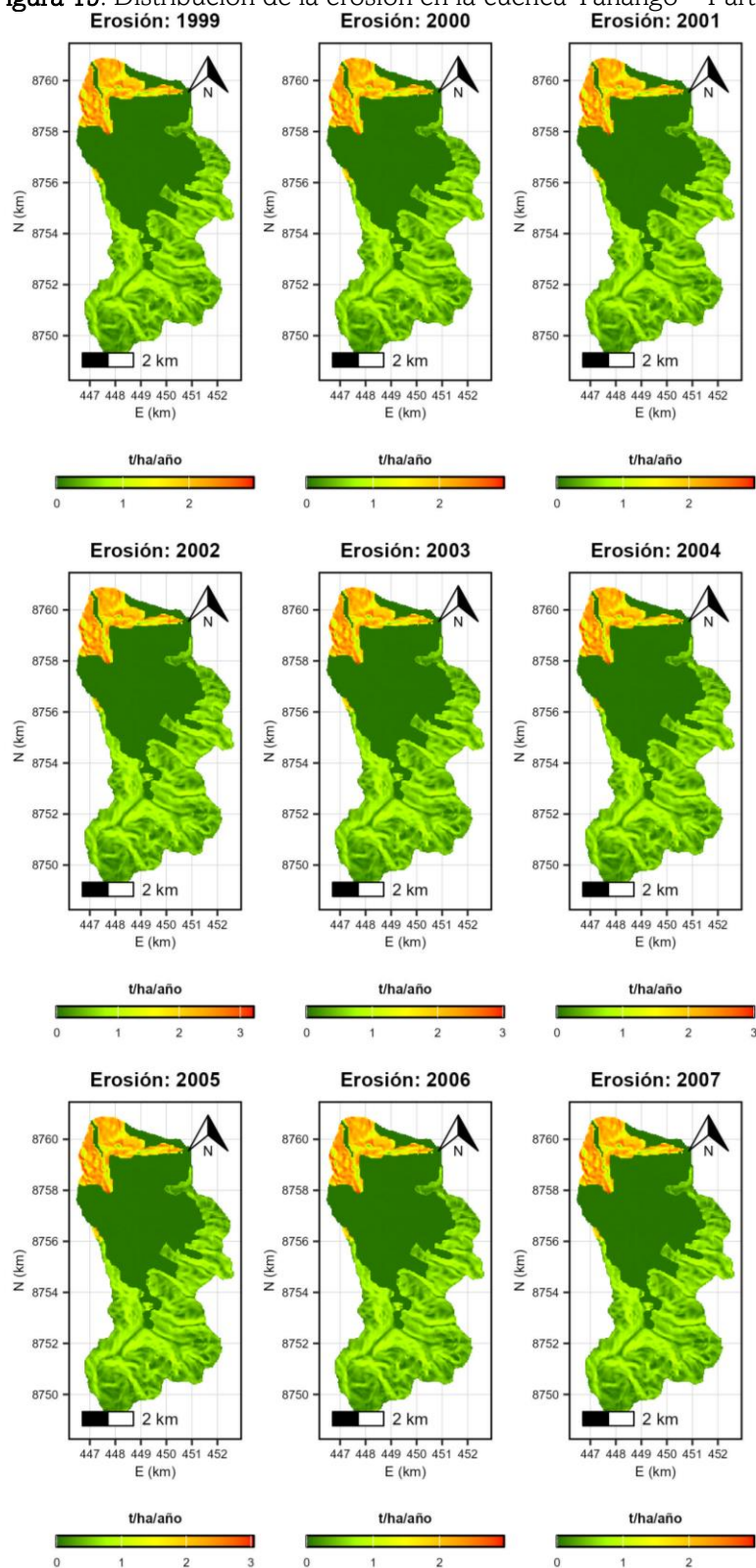
El hallazgo cuantitativo central es una tasa de erosión promedio para la totalidad de la cuenca de 3.16 tn/ha/año. Si bien este valor clasifica a la cuenca en un nivel de erosión moderado, el análisis espacial (Figura 16) revela que este promedio enmascara una zonificación del riesgo altamente heterogénea.

Figura 13: Distribución de la erosión en la cuenca Yanango – Parte 1

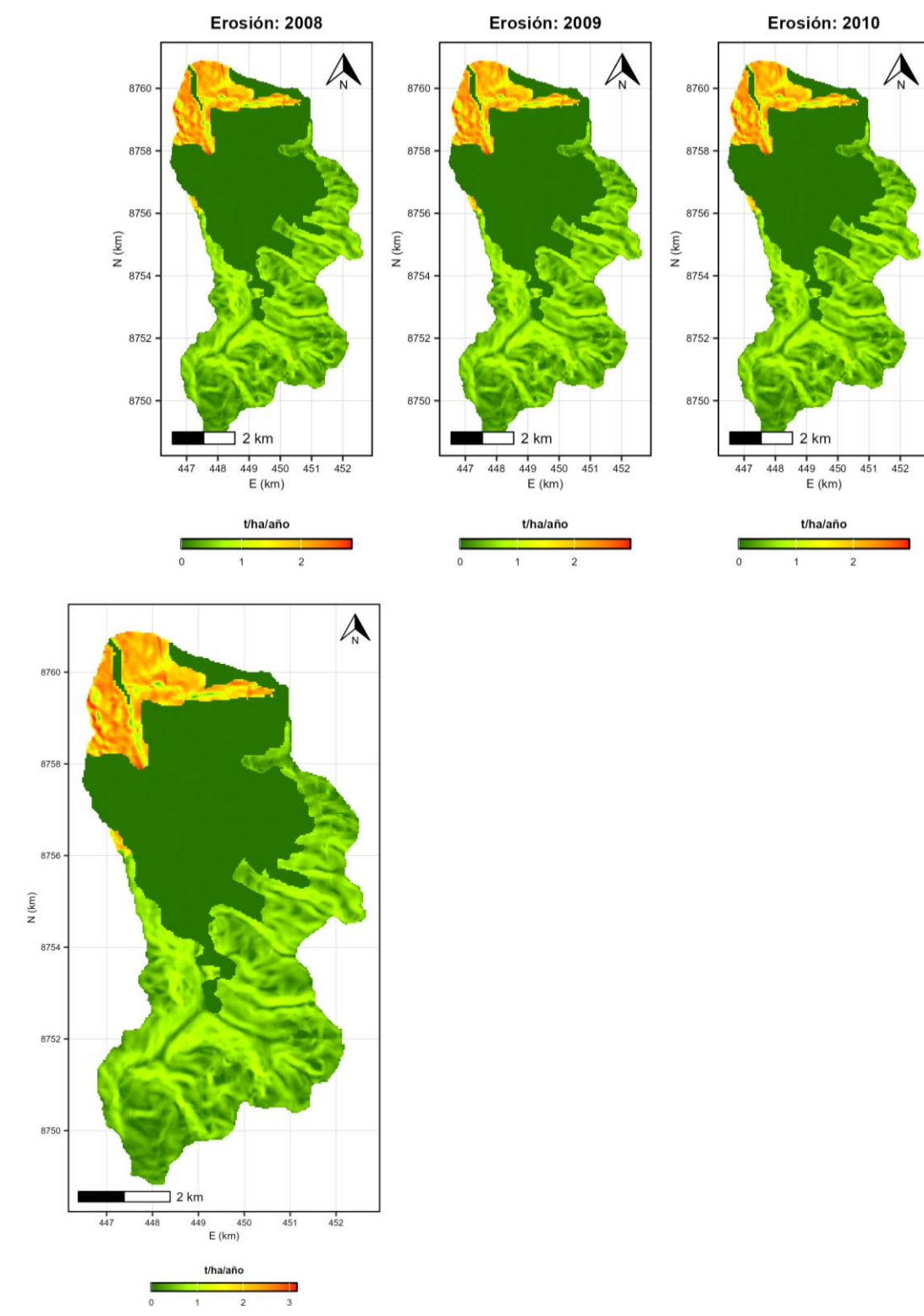
Figura 14: Distribución de la erosión en la cuenca Yanango – Parte 2



**Figura 15:** Distribución de la erosión en la cuenca Yanango – Parte 3



**Figura 16:** Distribución de la erosión en la cuenca Yanango – Promedio multianual



La integración espacial de los factores del modelo RUSLE permitió estimar la pérdida de suelo en la cuenca Yanango, cuyos resultados detallados por unidad de gestión se presentan en la Tabla 6. Se

determinó que la erosión media anual (A) oscila entre un mínimo de 1.11 t/ha/año y un máximo de 3.16 t/ha/año.

Desde una perspectiva espacial (ver Figura 1), los mayores niveles de degradación se concentran en el sector norte de la cuenca, específicamente en las subcuencas de cabecera SC-01 (3.16 t/ha/año) y SC-03 (3.14 t/ha/año), así como en la SC-05 (3.01 t/ha/año). Este patrón coincide con las zonas de mayor altitud y pendientes más pronunciadas, donde el factor topográfico (LS) alcanza valores superiores a 14.6.

Es relevante destacar la vulnerabilidad detectada en las subcuencas SC-01 y SC-02, que convergen directamente hacia el área del Puente y el Túnel Yanango (Figura 1). Asimismo, la SC-05, influenciada por la dinámica de la quebrada Umanpaccha, mantiene una alta producción de erosión. Por el contrario, las subcuencas de la zona sur y baja (SC-06 a SC-12) presentan una mayor estabilidad relativa, con tasas de erosión que promedian los 1.14 t/ha/año, debido a condiciones topográficas más moderadas.

**Tabla 6:** Matriz de factores y Tasa de Erosión por subcuenca.

| Subcuenca | Factor R (Promedio) | Factor K (Promedio)     | Factor LS<br>(Promedio) | Factor C<br>(Promedio) | Factor P<br>(Promedio) | Erosión (A)<br>(tn/ha/año) |
|-----------|---------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|
|           | MJ. mm. ha-1. h-1.  | ton. ha. h. ha-1. MJ-1. |                         |                        |                        |                            |
|           | año-1               | mm-1                    |                         |                        |                        |                            |
| SC-01     | 17.34               | 0.0184                  | 14.67                   | 0.23                   | 0.5                    | 3.16                       |
| SC-02     | 17.34               | 0.0184                  | 14.36                   | 0.54                   | 0.5                    | 2.93                       |
| SC-03     | 17.34               | 0.0184                  | 16.48                   | 0.17                   | 0.5                    | 3.14                       |
| SC-04     | 17.34               | 0.0184                  | 14.92                   | 0.06                   | 0.5                    | 3.00                       |
| SC-05     | 17.34               | 0.0184                  | 15.01                   | 0.17                   | 0.5                    | 3.01                       |
| SC-06     | 17.34               | 0.0184                  | 15.34                   | 0.07                   | 0.52                   | 1.15                       |
| SC-07     | 17.345              | 0.0184                  | 14.39                   | 0.08                   | 0.52                   | 1.15                       |
| SC-08     | 17.345              | 0.0184                  | 17.63                   | 0.07                   | 0.52                   | 1.18                       |
| SC-09     | 17.345              | 0.0184                  | 15.86                   | 0.07                   | 0.53                   | 1.14                       |
| SC-10     | 17.35               | 0.0184                  | 15.65                   | 0.08                   | 0.53                   | 1.11                       |
| SC-11     | 17.36               | 0.0184                  | 14.12                   | 0.08                   | 0.53                   | 1.12                       |
| SC-12     | 17.37               | 0.0184                  | 14.97                   | 0.08                   | 0.53                   | 1.11                       |



## DISCUSIÓN

El hallazgo central de este estudio es la marcada zonificación del riesgo erosivo en la cuenca Yanango, un fenómeno que las métricas regionales no logran capturar. Existe una clara dicotomía: las subcuencas aguas abajo (SC-01 a SC-05) concentran la erosión severa (promedio 3.0 tn/ha/año), mientras que las subcuencas aguas arriba (SC-06 a SC-12) son notablemente estables (promedio 1.12 tn/ha/año). Esta divergencia, que ocurre a pesar de factores R (climáticos) y K (edáficos) relativamente homogéneos, demuestra que el control primario del proceso erosivo en este sistema de Selva Alta no es ni climático ni edáfico, sino una interacción entre la topografía y el uso del suelo.

Este estudio logra desacoplar dos mecanismos de vulnerabilidad distintos que operan en la zona crítica (aguas abajo):

1. Control Geomorfológico (SC-04): Esta subcuenca presenta una alta erosión (3.00 tn/ha/año) a pesar de poseer una excelente cobertura vegetal protectora (Factor C = 0.06), típica de bosques maduros. La erosión, por tanto, está controlada casi exclusivamente por factores topográficos extremos (LS = 14.92).
2. Vulnerabilidad Antrópica (SC-02): Esta subcuenca, con una tasa de erosión similar (2.93 tn/ha/año), exhibe un Factor C de 0.54, indicativo de una cubierta vegetal degradada. Aquí, la erosión es una sinergia entre la pendiente y una gestión deficiente del suelo.

La implicación de esta dicotomía es fundamental para la gestión de riesgos. La erosión en la SC-04 es un proceso geológico natural, inherentemente difícil de mitigar con intervenciones convencionales. Por el contrario, la erosión en la SC-02 es, en gran medida, antrópicamente acelerada y, por tanto, mitigable mediante la mejora de los Factores C y P (cobertura vegetal y prácticas de conservación).

Estos hallazgos refinan y corrigen la escala de estudios nacionales previos (INRENA, 2005; SENAMHI, 2017). Dichos trabajos, si bien clasificaron la erosión regional como "moderada", postularon la necesidad de análisis locales.

Las subcuencas críticas (SC-01, SC-02, SC-03) son la fuente primaria de sedimentos que desembocan en la infraestructura vial y el Túnel Yanango. El colapso histórico del puente Yanango en 2005 por colmatación es una consecuencia directa de los procesos que este estudio ha cuantificado. Por lo tanto,



se prescribe que las intervenciones de mitigación deben ser focalizadas selectivamente en las subcuencas con alta vulnerabilidad antrópica (especialmente SC-02 y SC-03), donde se obtendrá el máximo retorno de inversión para la protección de la infraestructura.

## CONCLUSIONES

Se concluye que la tasa de erosión promedio de la cuenca Yanango (3.16 tn/ha/año), si bien califica como "moderada", es una métrica analíticamente insuficiente y engañosa para la gestión de riesgos de ingeniería. La modelización espacial demuestra que la erosión no es un proceso homogéneo, sino un fenómeno altamente concentrado. El riesgo real se localiza en "puntos calientes" específicos, revelando una clara dicotomía: las subcuencas altas (SC-06 a SC-12) muestran alta estabilidad (1.12 tn/ha/año), mientras que las subcuencas bajas (SC-01 a SC-05) exhiben tasas severas (promedio de 3.0 tn/ha/año). El factor de control dominante en este proceso es el topográfico (LS). En la geomorfología de Selva Alta de Yanango, el impacto de las pendientes pronunciadas (Factor LS promedio de 15.12) opaca la variabilidad de factores edáficos (K) o climáticos (R), ambos moderados. La metodología RUSLE demostró ser capaz no solo de cuantificar, sino de discernir las causas subyacentes: se diferenció la erosión de origen geológico (ej. SC-04, alta erosión con buena cobertura) de la acelerada por factores antrópicos (ej. SC-02, topografía más cobertura deficiente). Esta distinción es fundamental para definir la viabilidad de las intervenciones.

El aporte principal del estudio es la conexión causal y cuantitativa entre las fuentes de erosión identificadas y el riesgo de infraestructura. Se proporciona evidencia técnica de que las subcuencas bajas críticas (SC-01, SC-02, SC-03) son la fuente primaria de sedimentos que históricamente han afectado la infraestructura vial (ej. colapso del puente Yanango en 2005). Por tanto, los hallazgos prescriben que las medidas de mitigación (mejora de factores C y P) deben focalizarse selectivamente en estas subcuencas para lograr la protección efectiva del Túnel Yanango y optimizar la inversión.

Finalmente, se reconoce la limitación del modelo RUSLE al ser estático (promedio anual), lo cual impide analizar la dinámica de eventos extremos, causantes reales de las fallas en infraestructura. Se concluye la necesidad de implementar un monitoreo hidrológico *in situ* de caudales sólidos en tiempo real. Dicha información es indispensable para calibrar futuros modelos hidrológicos dinámicos (ej.



HEC-HMS) capaces de predecir la producción de sedimentos por tormenta y el riesgo de avenidas, superando así las limitaciones del modelo estático aquí empleado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amézquita, E. (1990). *Clasificación de los grados de Erodabilidad*.

Cabrejos, J. (2016). *Análisis del factor de cobertura vegetal (C)*.

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (2013).

*Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales*.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture*.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). *Metodología RUSLE para la pérdida de suelos*.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). *Digital Map of the World Soils (DMSW)*.

Hudson, N. (1982). *Clase de permeabilidad según textura*.

Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). (2005). *Estudio de erosión hídrica en el Perú*.

Jiang, Z., & Zheng, F. (1998). *Cálculo del factor LS en el modelo RUSLE*.

Kim, J. (2006). *Factor de prácticas de conservación (P) en la tasa de erosión*.

Rawis, W. J., et al. (1982). *Clasificación de permeabilidad y textura del suelo*.

Renard, K. G., et al. (1996). *Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*.

Rosas, J. (2016). *Erosión hídrica en países en vías de desarrollo*.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2017). *Tasas de erosión a nivel nacional y factores RUSLE*.

United States Department of Agriculture (USDA). (1983). *Clases de permeabilidad y parámetros de estructura del suelo*.

Vásquez, A., et al. (2016). *Geomorfología de la cuenca y sedimentación para la prevención de erosión en infraestructura vial*.



Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1962). Universal Soil Loss Equation (USLE). Manual del  
Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

