

Evaluación de las condiciones de degradación de suelos en una ladera afectada por erosión hídrica, municipio de la Plata, Colombia*

Daniel Rodríguez Acosta[✉] 

Deyanira Lobo Luján* 

Armando Torrente Trujillo* 

Resumen

Los procesos de erosión impactan negativamente la capacidad productiva de los suelos. Con el propósito de evaluar este impacto, se aplicaron el índice de productividad del suelo (IP) y el índice de riesgo de erosión (IRE) en seis zonas de una misma ladera ubicada en el municipio de la Plata, departamento del Huila, Colombia. Para la evaluación se tomaron cuatro muestras de suelo al azar en cada zona, en las cuales se determinaron: profundidad efectiva, grado y orientación de la pendiente, distribución de tamaño de partículas, carbono orgánico, densidad aparente, pH, tipo de estructura y permeabilidad. Asimismo, se estimaron: la evapotranspiración (ETO), el riesgo de escorrimiento, el índice de degradación específica y el impacto de la topografía. Los resultados evidenciaron diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$): la zona de cultivo no afectada presentó los valores más altos de productividad y menor riesgo de erosión; mientras que la zona media de la ladera evidenció baja productividad y altos valores de IRE, asociados a las mayores pendientes y a los cambios en las propiedades del suelo. En contraste, las zonas alta y baja registraron productividad moderada y valores de IRE también moderados. El IP permitió clasificar las zonas de ladera según su capacidad productiva, mientras que el IRE evidenció su vulnerabilidad a los procesos erosivos. Estos índices se constituyen en herramientas útiles para el diagnóstico de laderas, el establecimiento de medidas de prevención, rehabilitación, así como para el diseño de alternativas sostenibles de producción que favorezcan el manejo del recurso suelo.

Palabras clave: erosión en masa, productividad del suelo, riesgo de erosión, suelos de ladera.

Ideas destacadas: artículo de investigación. Los procesos erosivos disminuyen la productividad de los suelos; el IP permite evaluar sus efectos sobre la capacidad productiva, mientras que el IRE evidencia la vulnerabilidad frente a la erosión hídrica.



RECIBIDO: 18 DE ENERO DE 2023. | EVALUADO: 26 DE JUNIO 2023. | ACEPTADO: 15 DE ABRIL DE 2024.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Rodríguez Acosta, Daniel; Lobo Luján, Deyanira; Torrente Trujillo, Armando. 2025. "Evaluación de las condiciones de degradación de suelos en una ladera afectada por erosión hídrica, utilizando un índice de productividad y de riesgo de erosión". *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 34 (1supl): **-**. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v34n1supl.106825>.

* Investigación desarrollada dentro del proyecto doctoral: Desarrollo de un método sistemático para la rehabilitación ambiental de coberturas vegetales y control de erosión en áreas degradadas, bajo principios de bioingeniería de suelos. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA); Universidad Surcolombiana.

✉ Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), La Plata – Colombia. ✉ darodriguez@seña.edu.co – ORCID: 0000-0003-4167-1444.

* Universidad Central de Venezuela, Maracay – Venezuela. ✉ deyanira.lobo@ucv.ve – ORCID: 0000-0002-0444-6080.

* Centro de Investigación en Ciencias y Recursos GeoAgroAmbientales (CENIGAA), Neiva – Colombia. ✉ armando.torrente@gmail.com – ORCID: 0000-0001-6656-4624.

✉ Correspondencia: Deyanira Lobo, Universidad Central de Venezuela (ucv). Facultad de Agronomía, Departamento de Edafología, Aragua, Venezuela.

Evaluation of Soil Degradation Conditions on a Hillside Affected by Water Erosion Using a Productivity Index and Erosion Risk Index.

Abstract

Erosion processes negatively affect the productive capacity of soils. To evaluate this impact, the Soil Productivity Index (PI) and the Erosion Risk Index (ERI) were applied in six areas of a hillside located in the municipality of La Plata, Huila Department, Colombia. In each area, four random soil samples were collected, and the following parameters were measured: effective depth, slope degree and orientation, particle size distribution, organic carbon, bulk density, pH, soil structure, and permeability. In addition, reference evapotranspiration (ETO), runoff risk, specific degradation index, and topographic impact were determined. The results showed highly significant differences ($p < 0.0001$). The cultivated area (not affected) exhibited the highest productivity values and the lowest erosion risk. In contrast, the middle zone of the hillside showed low productivity and high ERI values, associated with steeper slopes and altered soil properties. The upper and lower zones displayed moderate productivity and moderate ERI values. The PI proved useful for classifying hillside zones according to their productive capacity, while the ERI highlighted their vulnerability to erosive processes. Together, these indices provide valuable tools for the diagnosis of hillside soils, enabling the design of prevention and rehabilitation measures, as well as the development of sustainable production alternatives that support the integral management of soil resources.

Keywords: erosion risk, hillside soils, mass erosion, soil productivity.

Highlights: research article. Erosive processes reduce soil productivity; the PI allows assessment of water erosion effects on productive capacity, while the ERI reveals vulnerability to erosion.

Avaliação das condições de degradação do solo em uma encosta afetada por erosão hídrica, usando um índice de produtividade e risco de erosão

Resumo

Os processos erosivos impactam negativamente a capacidade produtiva dos solos. Com o objetivo de avaliar esse impacto, aplicaram-se o Índice de Produtividade do Solo (IP) e o Índice de Risco de Erosão (IRE) em seis áreas de uma mesma encosta, localizada no município de La Plata, departamento de Huila, Colômbia. Para a avaliação, coletaram-se quatro amostras aleatórias de solo em cada área da encosta, nas quais foram determinados: profundidade efetiva, grau e orientação da declividade, distribuição granulométrica, carbono orgânico, densidade aparente, pH, tipo de estrutura e permeabilidade. Além disso, estimaram-se a evapotranspiração de referência (ETO), o risco de escoamento, o índice de degradação específica e o impacto da topografia. Os resultados apresentaram diferenças altamente significativas ($p < 0,0001$). A área de cultivo (não afetada) obteve os maiores valores de produtividade e menor risco de erosão. Já a zona média da encosta apresentou baixos valores de produtividade e altos valores de IRE, associados às maiores declividades e às mudanças nas propriedades do solo. As zonas alta e baixa resultaram em produtividade moderada e valores moderados de IRE. O IP mostrou-se eficaz para classificar as diferentes áreas da encosta quanto à sua capacidade produtiva, enquanto o IRE evidenciou a vulnerabilidade aos processos erosivos. Em conjunto, esses índices contribuem para o diagnóstico dos solos de encosta, possibilitando a definição de medidas de prevenção e reabilitação, bem como o desenvolvimento de alternativas produtivas sustentáveis para o manejo integrado do recurso solo.

Palavras-chave: erosão em massa, produtividade do solo, risco de erosão, solos de encosta.

Ideias destacadas: artigo de pesquisa. Uma das consequências dos processos erosivos é a redução da produtividade do solo. O IP permite avaliar os efeitos da erosão hídrica sobre a capacidade produtiva, enquanto o IRE revela sua vulnerabilidade.

Introducción

La productividad de la tierra suele representarse por el rendimiento de los cultivos o la producción animal por hectárea, lo cual depende de la productividad del suelo, el clima y las prácticas de manejo agrícola (FAO 1985). Dengiz et ál. (2010) coinciden en que la capacidad productiva de la tierra incluye al suelo, clima, topografía y propiedades biológicas, con fines de producción, conservación y gestión ambiental. Esta debe diferenciarse de la productividad del suelo o capacidad productiva del suelo, que es una expresión de factores inherentes, tales como el material parental, la topografía, las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como la infraestructura para riego y drenaje, por lo que puede considerarse relativamente más estable que la productividad de la tierra (Zhang et ál. 2004).

La función de los suelos asociada a la capacidad de producir biomasa vegetal, es decir la función de productividad, sigue siendo fundamental, por su relación con los problemas globales como la seguridad alimentaria, las demandas de energía y agua, el balance de carbono y el cambio climático. Esta función no se restringe al contexto agrícola, ya que los suelos en ecosistemas naturales también suelen proporcionar funciones de productividad (Mueller et ál. 2010). Esta cualidad de los suelos puede evaluarse de manera directa o indirecta. Usualmente, las evaluaciones directas se realizan en experimentos de campo, invernadero o laboratorio bajo condiciones determinadas de clima, uso y manejo del suelo, mientras que las evaluaciones indirectas consisten en desarrollar y aplicar modelos de diversa complejidad con el fin de estimar la productividad (Delgado y López 1998; Dengiz 2007).

Los procesos de erosión hídrica, entendidos como fenómenos naturales en los que la remoción y el transporte de material del suelo ocurren principalmente por la acción de agentes erosivos como el agua, el viento, la gravedad y las perturbaciones humanas (Hacisalihoglu, Oktan y Yucesan 2010), han sido motivo de preocupación, debido a que las pérdidas de suelo se acompañan de pérdidas de materia orgánica, estructura, capacidad de retención de agua, nutrientes y profundidad para el enraizamiento, entre los impactos negativos (Lobo 1990; Lal 2001; Poesen 2018). Tales problemas han mostrado pronósticos de mayor severidad en función de la degradación del suelo y el cambio climático, particularmente en tierras tropicales y subtropicales (Lal 2001).

Sin embargo, la cuantificación del impacto de la erosión hídrica sobre las funciones del suelo ha sido difícil, debido a que los estudios deben considerar las complejas

interrelaciones entre la productividad del suelo y la variación en la posición del paisaje, las temporadas de crecimiento y los regímenes de disponibilidad de humedad, así como entre la posición del paisaje y la tasa de erosión (Daniels et ál. 1985). Esto requeriría diseños experimentales basados en consideraciones complejas, dado los múltiples factores que inciden, tales como las diferentes cualidades de los suelos, el clima, el cultivo de referencia, el nivel de manejo y otros factores de orden socioeconómico, que interactúan de manera muy dinámica y dificultan la interpretación de las relaciones causa-efecto (Rodríguez 2018). De esta complejidad surge la necesidad de aumentar el conocimiento de las relaciones cuantitativas entre el crecimiento de las plantas y las propiedades del suelo que podrían verse afectadas por la erosión (Agber y Anjembe 2012).

El desarrollo de un índice de productividad se basa en el uso de propiedades del suelo simples y fáciles de medir, con el fin de predecir el efecto del entorno del suelo en el crecimiento de las raíces, donde el efecto combinado de los factores individuales es más multiplicativo que aditivo (Ziblim, Okai-Anti y Asmah 2012).

El Índice de Productividad (IP) desarrollado por Pierce et ál. (1983) ha servido como una herramienta útil para estimar el potencial productivo relativo de diferentes suelos, los impactos de la erosión sobre productividad a largo plazo, así como las pérdidas de suelo permisibles para la planificación de la conservación (El-Swaify y Fownes 1989). También ha sido utilizado para evaluar los impactos de la erosión sobre la productividad del suelo (Lobo, Lozano y Delgado 2005; Dengiz 2007). En la clasificación de tierras agrícolas bajo uso de horticultura de piso alto, el IP se ha empleado para proponer prácticas de conservación y manejo del recurso suelo que contribuyan a reducir la degradación de los recursos naturales (Dengiz 2007; Pineda et ál. 2009), así como para determinar si las diferencias observadas en los rendimientos en diferentes unidades cartográficas son atribuibles a las variables del suelo (Díaz et ál. 2009), o para evaluar el efecto de diferentes sistemas de labranza (Bako, Mamai y Istifanus 2021).

Este índice también ha sido modificado para evaluar los impactos de la erosión sobre la productividad de los suelos bajo diferentes manejos, incluyendo de manera específica los rendimientos de un cultivo en particular, con el fin de estimar los impactos de la erosión sobre la producción en diferentes años y bajo diferentes prácticas de manejo (Ajon, Agber y Ali 2018), o considerando otras variables de suelo y clima de interés local (El-Nady 2015; Sambodo, Setiawan y Rokhmaningtyas 2018), y como metodología de evaluación de procesos de degradación en áreas con información

insuficiente para la planificación de usos sostenibles de la tierra (Mejía y Vera 2002). Otras investigaciones han empleado el IP para evaluar procesos de recuperación en zonas afectadas mediante prácticas de manejo como la incorporación de lodos modificados (Halecki y Klatka 2021).

Dado que la profundidad enraizable de un suelo y las características de los horizontes que se relacionan con el desarrollo de las raíces reflejan su potencial productivo, existe una relación estrecha entre la profundidad de enraizamiento potencial y su productividad. Así, el principal impacto de la erosión puede explicarse por la pérdida de la capacidad de almacenamiento de agua, nutrientes, estructura del suelo y uniformidad de las condiciones del suelo en los campos de cultivo (Kiniry, Scrivner y Keener 1983; Rodríguez 2018).

En Colombia, el 40 % de los suelos del área continental e insular se encuentran afectados por algún grado de erosión hídrica: el 2,9 % presenta erosión severa y muy severa, un 16,8 % erosión moderada y un 20 % erosión ligera. En la porción del territorio severa o muy severamente afectado, las funciones y los servicios originales de los suelos —como la fertilidad, la regulación y el almacenamiento de agua, la biodiversidad, entre otros— están completamente destruidos; su restauración resulta muy difícil, costosa y requiere de largo tiempo (IDEAM, MADS y UDCA 2015).

En el departamento del Huila, Colombia —área de estudio de esta investigación—, son comunes los impactos ambientales derivados de la erosión hídrica, ocasionados tanto por fenómenos naturales como por actividades antrópicas.

Estos se manifiestan en la baja estabilidad de los materiales que conforman el suelo, lo que a su vez afecta la infraestructura regional y la integridad de los recursos naturales, poniendo en riesgo ecosistemas estratégicos, zonas potenciales para la seguridad alimentaria, vías de comunicación, entre otros. Por ello, en este trabajo se propone evaluar los efectos de la erosión severa en una ladera afectada dentro del área objeto de análisis, utilizando el IP e IRE.

Metodología

Área de estudio

El área de estudio está ubicada en la vereda Lusitania del municipio de La Plata, departamento del Huila, Colombia (Figura 1), en las coordenadas geográficas 02° 24' 9" N; 75° 45' 7" O, con altitud de 1.530 m s. n. m., temperatura media anual de 23,7 °C, temperatura máxima promedio de 24,15 °C en febrero y mínima de 17,08 °C en septiembre. La precipitación tiene una distribución bimodal, con media anual de 1.590 mm (promedio de 2000 a 2021), una máxima mensual de 205,3 mm en noviembre y una mínima de 43,6 mm en agosto. La evapotranspiración de referencia (ETO) media anual es de 1.120 mm, calculada mediante el método de Thornthwaite. Los suelos de la zona se clasifican como Alfisoles; sin embargo, en la ladera objeto de estudio se evidencia la decapitación parcial o total del horizonte superficial, aflorando a la superficie el horizonte argílico (Tabla 1).

Tabla 1. Características de las seis zonas de ladera objeto de estudio

| Características del suelo o terreno | Zonas de estudio | | | | | |
|-------------------------------------|--|--|---|--|--|--|
| | Zona de cultivo (no afectada por los procesos de remoción en masa) | Zona Alta (donde inician los procesos de remoción en masa) | Zona Media 1 (de mayor inclinación en margen izquierda con dirección al sur-este) | Zona Media 2 (de mayor inclinación en el centro de la ladera con dirección sur-este) | Zona Media 3 (de mayor inclinación en margen derecha con dirección sur-este) | Zona baja (pie de ladera sometida a procesos de degradación con pérdidas y ganancia de sedimentos) |
| Pendiente (p) % | 16,6 | 33,4 | 132,2 | 100,9 | 87,7 | 29,8 |
| Prof. efectiva (cm) | 57,5 | 30 | 10 | 10 | 10 | 40 |
| % Arcilla | 15,75 ± 6,39 | 24,25 ± 7,72 | 51,75 ± 3,5 | 29 ± 3,83 | 27 ± 1,15 | 32,5 ± 14,5 |
| % Limo | 36 ± 9,42 | 29,75 ± 2,5 | 24,5 ± 4,36 | 30,25 ± 1,5 | 31 ± 11,04 | 30,25 ± 7,54 |
| % Arena muy fina | 24,5 ± 9,75 | 10,5 ± 1,73 | 6 ± 1,41 | 16 ± 5,77 | 10,5 ± 3,87 | 12,25 ± 11,35 |
| % Arena fina | 17,75 ± 5,62 | 8,5 ± 2,52 | 4,75 ± 1,5 | 11 ± 1,82 | 11,25 ± 5,85 | 6,5 ± 4,43 |

| | | | | | | |
|---------------------|--------------|------------------------|-------------|------------------|--------------|------------------|
| % Arena media | 3 ± 0,81 | 5,5 ± 3,41 | 3 ± 2 | 3 ± 0,82 | 4,5 ± 4,35 | 5 ± 3,16 |
| % Arena gruesa | 1,75 ± 0,96 | 8,5 ± 3,41 | 5,25 ± 3,77 | 3,75 ± 0,5 | 7,75 ± 4,99 | 6,75 ± 3,77 |
| % Arena muy gruesa | 1,25 ± 0,5 | 13 ± 4,76 | 4,75 ± 2,21 | 7 ± 2,94 | 8 ± 4,83 | 6,75 ± 4,57 |
| % Total Arena | 48,25 | 46 | 23,75 | 40,75 | 42 | 37,25 |
| Clase textural | Franco | Franco arcillo arenoso | Arcilloso | Franco arcilloso | Franco | Franco arcilloso |
| pH | 5,04 ± 0,32 | 4,93 ± 0,30 | 4,98 ± 0,25 | 4,7 ± 0,26 | 4,87 ± 0,17 | 4,87 ± 0,34 |
| % MO | 2,545 ± 1,10 | 1,91 ± 1,06 | 0,65 ± 0,52 | 1,85 ± 1,15 | 1,085 ± 0,28 | 0,776 ± 0,65 |
| Grado de estructura | Moderada | Débil | Débil | Débil | Débil | Débil |
| Densidad aparente | 1,15 ± 0,1 | 1,16 ± 0,085 | 1,48 ± 0,03 | 1,47 ± 0,085 | 1,46 ± 0,088 | 1,37 ± 0,16 |

Selección de los sitios y toma de muestras de suelo

En un área afectada por la construcción de una vía de comunicación, el uso inadecuado de la explotación agropecuaria y el mal manejo en la conducción de las aguas,

se seleccionaron seis zonas de una misma ladera, de las cuales cinco se encontraban expuestas a procesos de degradación del suelo y se clasificaron como se muestra en la Tabla 1. Las zonas seleccionadas para la investigación, así como los puntos de muestreo, se presentan en la Figura 2.

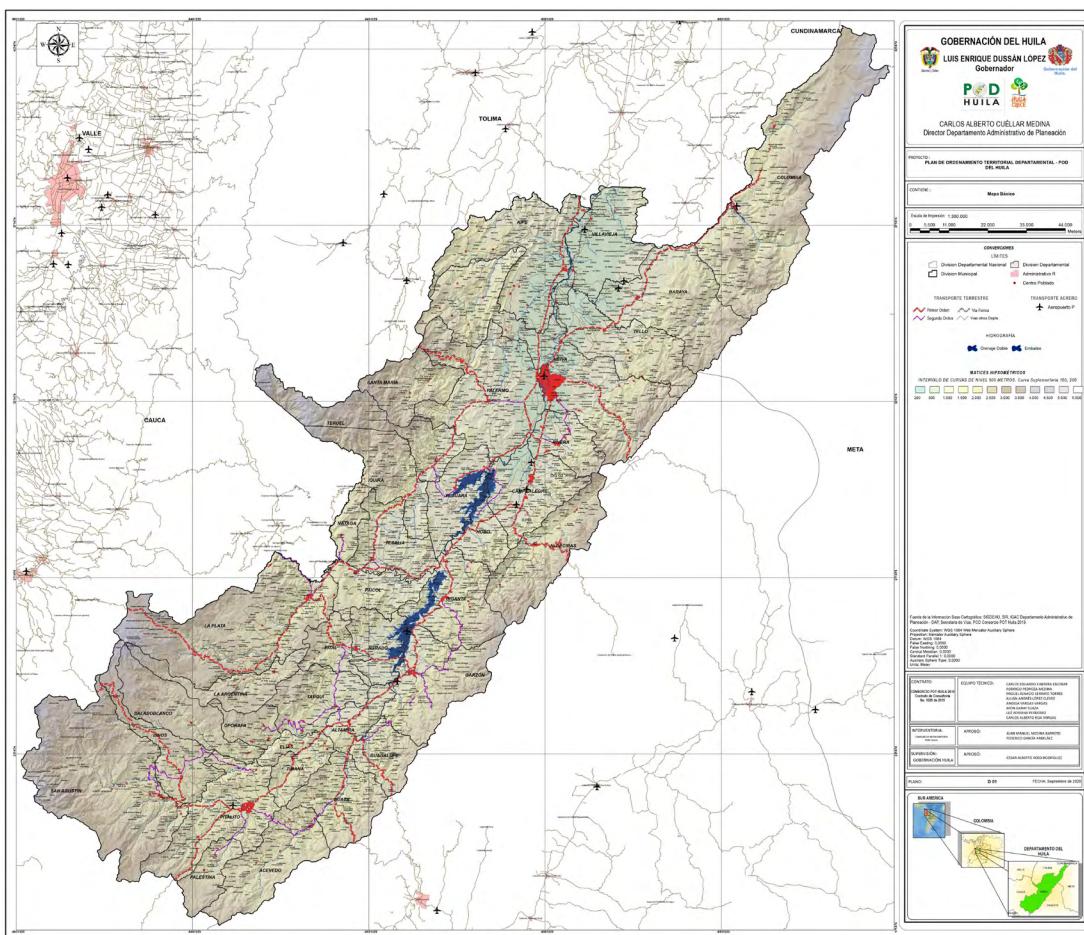


Figura 1. Ubicación del área de estudio.
Datos: Gobernación del Huila (2024).

Mediciones en el terreno

En cada una de las seis zonas en que se dividió la ladera se seleccionaron cuatro puntos de muestreo del suelo, en los cuales se tomaron cuatro muestras disturbadas y cuatro muestras no disturbadas en los 20 cm superficiales de suelo, completamente al azar. En total se establecieron veinticuatro puntos de muestreo, siguiendo el protocolo propuesto por el Instituto

Geográfico Agustín Codazzi (IGAC 2006). Cabe destacar que los suelos de la zona media fueron muestreados hasta 10 cm de profundidad.

Para medir la profundidad efectiva se realizaron calicatas de aproximadamente 2.500 cm² de área por 100 cm de profundidad, y se midió con un flexómetro hasta donde llegaban las raíces de las plantas.



Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo en las zonas de la ladera seleccionadas.

Fotografías de Rodríguez, febrero 2022

Para la medición del gradiente de la pendiente se midió la longitud horizontal de cada una de las zonas de ladera con una cinta métrica y un nivel de mangueira, con el fin de evitar inclinaciones. Posteriormente se midió la verticalidad de cada zona utilizando una mira de PVC. Con los datos obtenidos se calculó la tangente de la superficie dividiendo el cambio vertical en altitud entre la distancia horizontal (Ecuación 1).

$$P\% = \frac{h}{X} \times 100 \quad P^\circ = \left[\text{ATAN} \frac{P\%}{100} \right]$$

Donde: P% = pendiente en porcentaje; h = cambio vertical en altitud (cateto opuesto); X = distancia horizontal punto a nivel (cateto adyacente); P° = pendiente en grados; ATAN = arco tangente del ángulo.

Evaluaciones en las muestras de suelo

El estudio de cada una de las muestras se realizó en el laboratorio de suelos de la Universidad Surcolombiana, donde se determinaron las siguientes variables: distribución de tamaño de partículas por el método de Bouyoucos modificado (Day 1965; Pla Sentís 1983; Forsythe 1975; Gee y Bauder 1986), y contenido de carbono orgánico por el método Walkley-Black, de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 5403 (Icontec 2006).

La medición del pH se efectuó en una suspensión 1:1, según la norma NTC 5264 (Icontec 2008), mientras que la densidad aparente se determinó en muestras no disturbadas mediante el método del cilindro de volumen conocido (Blake y Hartge 1986).

Implementación del modelo Índice de Productividad (ip)

Para evaluar los impactos de la erosión sobre la productividad del suelo se seleccionó el modelo de Índice de Productividad desarrollado por Pierce et ál. (1983), siguiendo el protocolo propuesto por Delgado y López (1998). Este modelo asume que el suelo es un factor determinante en el rendimiento de los cultivos porque proporciona un entorno adecuado para el crecimiento de las raíces y prevé que, bajo condiciones similares de clima, cultivo y manejo, el rendimiento depende de las condiciones edáficas. Dichas condiciones propician un ambiente favorable para el crecimiento radical, y el índice se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$IP = \sum_{i=1}^n (A_i * B_i * C_i * K_i)$$

Donde:

IP representa al índice de productividad del suelo, con valores entre 0 y 1; un valor de 1 corresponde a un suelo sin limitaciones para el desarrollo de raíces.

A_i es el factor que evalúa las condiciones que regulan las relaciones agua-aire en el horizonte i . Puede valorarse a partir de A_1 (capacidad de almacenamiento de agua disponible en el suelo) o de A_2 (la aireación del suelo). En este caso se seleccionó el factor A_2 , cuya valoración se realizó con base en el grado de estructura y en los contenidos de arcilla de cada suelo en las zonas de estudio, aplicando las ecuaciones mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Subfactor que evalúa la capacidad de aireación del suelo (A_2)

| Estructura | Arcilla (%) | A_2 |
|------------|-------------|-----------------|
| Débil | ≤ 20 | 1,0–0,010 (Arc) |
| | > 20 | 1,2–0,020 (Arc) |
| Moderada | ≤ 30 | 1,0–0,007 (Arc) |
| | > 30 | 1,3–0,016 (Arc) |
| Fuerte | ≤ 40 | 1,0–0,005 (Arc) |
| | > 40 | 1,3–0,013 (Arc) |

Nota: Arc = contenido de arcilla.

B_i es el factor que evalúa las condiciones que determinan la resistencia mecánica (impedimentos) para la exploración de las raíces en el horizonte i . Puede valorarse a partir de B_1 (condición de compactación del suelo) o de B_2 (contenido volumétrico de fragmentos gruesos). En

este caso se seleccionó B_1 , considerando la información sobre la textura de suelo y la densidad aparente (DA) en cada zona de ladera, y se aplicaron las ecuaciones correspondientes (Tabla 3). Cabe precisar que $B_1 = 1$ si $DA \leq 1,30$ para cualquier textura.

Tabla 3. Subfactor que evalúa la compactación (B_1)

| Texturas | DA | B_1 |
|----------|-----------|----------------|
| Finas | 1,30–1,40 | 3,60–2,00 (da) |
| | 1,41–1,60 | 6,40–4,00 (da) |
| Medias | 1,30–1,55 | 1,90–0,70 (da) |
| | 1,56–1,80 | 6,00–3,33 (da) |
| Gruesas | 1,30–1,80 | 1,50–0,40 (da) |
| | 1,81–2,00 | 8,00–4,00 (da) |

Nota: DA = densidad aparente (Mg/m^3).

C_i es el factor que evalúa las condiciones que regulan la fertilidad potencial del horizonte i . Puede valorarse a partir de la condición más limitante entre la reacción del suelo y el aluminio intercambiable (C_1), o bien del contenido de materia orgánica (C_2). En este estudio se seleccionó C_1 , calculado con los valores de pH de cada una de las zonas de ladera, y luego se procedió a implementar las ecuaciones que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Subfactor que evalúa la fertilidad potencial a partir del pH (C_1)

| pH | C_1 |
|----------|------------------|
| < 2,8 | 0 |
| 2,8–4,5 | 0,5 (pH)–1,35 |
| 4,6–5,5 | 0,45 + 0,10 (pH) |
| 5,6–7,0 | 1 |
| 7,1–8,5 | 1,91–0,13 (pH) |
| 8,6–10,5 | 4,20–0,4 (pH) |
| > 10,5 | 0 |

K_i representa al factor que evalúa la importancia relativa del horizonte i en el perfil del suelo (peso específico del respectivo horizonte). Para este estudio se determinó la profundidad efectiva de los suelos en cada una de las zonas de ladera (x) y se procedió a implementar la siguiente ecuación:

$$K_{\text{acum}} = 0,024 * X^{0,82}$$

Donde: K_{acum} es el factor de ponderación acumulado hasta el horizonte i ; x es la profundidad máxima del horizonte i (cm).

Implementación del modelo ire

Dadas las condiciones de la zona bajo estudio, afectada por procesos de erosión acelerada manifestados en movimientos en masa, se consideró importante incluir la evaluación del riesgo de erosión potencial, el cual estaría representada por la máxima pérdida de suelos en ausencia de cobertura vegetal y de prácticas de conservación. Para ello se realizaron estimaciones con base en la propuesta de Delgado (1997), tomando en cuenta cuatro factores fundamentales que determinan la susceptibilidad del suelo a la erosión hidráulica: las características hidrológicas del suelo (capacidad de infiltración), la agresividad de la lluvia, la pendiente del terreno y la orientación de la pendiente respecto de la dirección de vientos y lluvias predominantes.

El IRE evalúa la presencia de condiciones potenciales que facilitan la pérdida de suelos. Su valor se estima en una escala de 0 a 1 y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

Factor α : evalúa el potencial de escurrimiento a partir de la granulometría y del grado de estructura del suelo, y se calcula a partir de las variables mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Factor que evalúa el potencial escurrimiento

| Granulometría predominante | Clase Textural | Grado de Estructura | α |
|----------------------------|--|---------------------|-------------|
| Gruesa | Franco Arenoso; Arenoso | Débil | 0,7–0,20(g) |
| | | Moderada | 0,7–0,25(g) |
| | | Fuerte | 0,7–0,30(g) |
| Media | Franco; Franco arcilloso; Franco arcillo arenoso | Débil | 0,8–0,15(g) |
| | | Moderada | 0,8–0,20(g) |
| | | Fuerte | 0,8–0,25(g) |
| Fina | Arcillo arenoso; Franco limoso; Limoso | Débil | 0,9–0,10(g) |
| | | Moderada | 0,9–0,15(g) |
| | | Fuerte | 0,9–0,20(g) |
| Muy Fina | Arcilloso; Arcillo Limoso; Franco Arcillo Limoso | Débil | 1,0–0,05(g) |
| | | Moderada | 1,0–0,10(g) |
| | | Fuerte | 1,0–0,15(g) |

Nota: α = factor que evalúa el escurrimiento superficial potencial del suelo; g = fracción decimal volumétrica de partículas arenosas ($d > 0,05$ mm).

Factor β : evalúa la agresividad relativa de la lluvia utilizando el índice de degradación específica de Fournier (IF), que indica el grado de concentración de las lluvias con relación con el total anual de agua caída en el área de estudio. Este índice se correlaciona con los arrastres anuales de sedimentos (Fournier 1960) y se calcula mediante la ecuación:

$$IF = \frac{p^2}{P}$$

Donde: IF es el índice de Fournier; p es la mayor precipitación media mensual registrada (mm); P es la precipitación media anual (mm).

Para el cálculo de este factor se empleó una serie histórica de veintiún años (2000-2021) correspondiente a la estación meteorológica del IDEAM, Escuela Agrícola La Plata (21055020). Posteriormente se aplicó la ecuación de la Tabla 6 para estimar el factor β .

Tabla 6. Factor que evalúa la agresividad de la lluvia

| IF | β | Valores de referencia para índice de Fournier | |
|-----------|-------------------|---|---------------|
| ≤ 65 | $0,35 + 0,01 (p)$ | IF | Clasificación |
| > 65 | 1 | < 15 | Muy bajo |
| | | 16-30 | Bajo |
| | | 31-50 | Moderado |
| | | 51-65 | Alto |
| | | > 65 | Muy alto |

Factor η : evalúa el impacto de la topografía (pendiente del terreno) en el riesgo a la erosión. Se obtiene de la ecuación presentada en la Tabla 7.

Tabla 7. Factor que evalúa el efecto de la pendiente

| m (%) | η |
|-----------|---------------------|
| ≤ 75 | $0,45 + 0,0075 (m)$ |
| > 75 | 1 |

Donde: m es la pendiente del terreno en (%); η es el valor del factor que evalúa la pendiente.

Factor ε : define la influencia climática, dado que las principales lluvias, vientos e insolación proviene del norte, lo que intensifica la exposición en esa dirección. En la Tabla 8 se muestra la clasificación y los valores correspondiente para la orientación de la pendiente y el cálculo del factor ε .

$$\varepsilon = e^{-x_2}$$

Donde: e es el logaritmo base e ; x es la codificación para 0° a 360° de orientación de la pendiente; ε es el valor del factor orientación de la pendiente.

Tabla 8. Factor orientación de la pendiente

| Orientación de la pendiente | Valor | Clase | Clasificación |
|--|-------------|----------|---------------|
| 0° a $22,5^\circ$ /337,5° a 360° | 1-0,875 | N | Muy alto |
| $22,5^\circ$ a $67,5^\circ$ /292,5° a 337,5° | 0,875-0,625 | NE-NO | Alto |
| $67,5^\circ$ a $112,5^\circ$ /247,5° a 292,5° | 0,625-0,375 | E-O | Moderado |
| $112,5^\circ$ a $247,5^\circ$ | 0,375-0 | SE-S- SO | Bajo |

Diseño y análisis estadístico

Se implementó un modelo unifactorial, en el cual se tomó como factor las zonas de ladera seleccionadas, con seis niveles: zona de cultivo (ZC), zona alta (ZA), zona media 1 (ZM_1), zona media 2 (ZM_2), zona media 3 (ZM_3) y zona

baja (ZB). En cada zona se tomaron cuatro muestras de suelo completamente al azar, para un total de veinticuatro unidades experimentales. Los datos fueron procesados mediante el programa Design expert 11 y Microsoft Excel.

Resultados

Factores que determinan la productividad de los suelos en la ladera evaluada

Se observa en la Figura 3a que las condiciones que regulan la relación agua-aire en los suelos de la ladera son significativamente afectadas por los procesos de erosión hídrica acelerada.

Se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre los valores medios del subfactor A_2 de la ZC y ZM_1 , así como diferencias significativas entre la ZC y el resto de las zonas de la ladera. La ZM_1 presentó las condiciones más limitantes que regulan las relaciones agua-aire en el suelo en comparación con el resto de las zonas evaluadas. No se presentaron diferencias significativas entre las ZA, ZM_2 , ZM_3 y ZB. Estas diferencias estarían asociadas con el tipo de estructura y contenidos de arcillas considerados en la evaluación de esta cualidad.

Se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$), para el subfactor B_1 (condiciones que determinan la resistencia mecánica para la exploración de las raíces del cultivo) entre la ZC y la ZM_1 , así como

diferencias significativas con las ZM_2 y ZM_3 , mientras que se conservaron similitudes entre las ZC, ZB y ZA. En la parte baja de la ladera, se presentaron diferencias significativas entre la ZM_1 y las ZM_2 , ZM_3 .

En la Figura 3b se muestra el comportamiento de los valores medios de B_1 en cada una de las zonas de ladera, lo cual podría explicarse por los cambios en la textura del suelo y la densidad aparente, que en este caso definen las impedancias mecánicas del suelo.

Con relación a las condiciones que regulan la fertilidad potencial del suelo, no se encontraron diferencias significativas en los valores de C_1 para las seis zonas de ladera, ya que los suelos de las diferentes zonas presentan valores de pH en el mismo rango de calificación (moderado a fuertemente ácido).

Al evaluar la importancia relativa de la profundidad efectiva, se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) en el factor k entre las ZC y la ZB frente a las demás. Las zonas de mayor pendiente (ZM_1 , ZM_2 y ZM_3) no presentaron diferencias significativas entre sí, pero sí frente a la ZC, ZA y ZB, como se observa en la Figura 3c. Esto sería una manifestación de la afectación del proceso erosivo sobre la profundidad efectiva de los suelos.

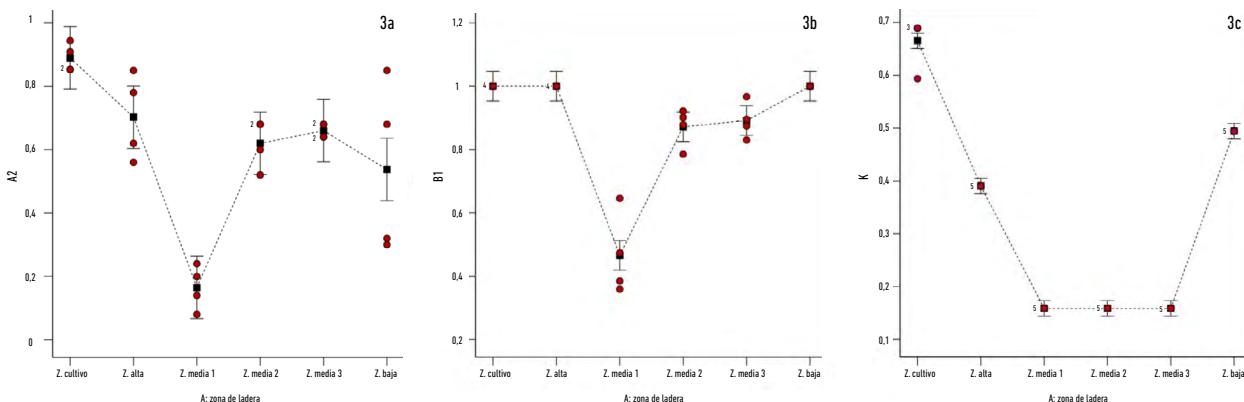


Figura 3. Factores que determinan la productividad de los suelos en la ladera evaluada. a) condiciones que regulan la relación agua-aire (A_2); b) condiciones que determinan la resistencia mecánica para la exploración de las raíces del cultivo (B_1); c) importancia relativa de la profundidad del suelo (k).

Índice de productividad en los suelos de la ladera evaluada

La zona de cultivo presentó los mayores valores de IP, los cuales resultaron altamente significativos ($p < 0,0001$) frente a las zonas de ladera con procesos de degradación del suelo. No se encontraron diferencias significativas

en los valores de IP en los suelos de la zona media (ZM_1 , ZM_2 y ZM_3), ni tampoco entre las ZA y ZB. Sin embargo, al contrastar las zonas de mayor pendiente media (ZM_1 , ZM_2 y ZM_3), con las ZA y ZB, se identificaron diferencias significativas, como se observa en la Figura 4.

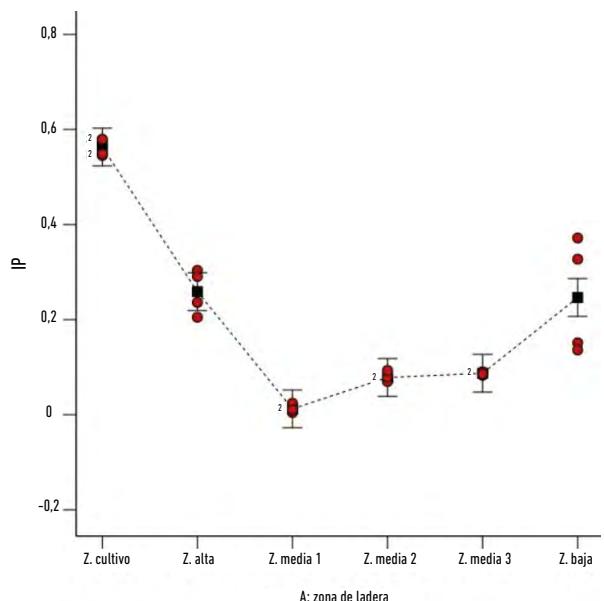


Figura 4. Comportamiento del índice de productividad (IP) en los suelos evaluados.

Con respecto al IP, se encontraron valores que corresponden a una productividad alta en la ZC, la cual no estuvo expuesta a los impactos generados por movimientos en masa. En la zona media de la ladera se evidencian los efectos del proceso de degradación, al presentar bajos valores de productividad asociados a las mayores pendientes y a cambios en las propiedades de los suelos. Los suelos de las ZA y ZB presentaron valores del IP correspondientes a una productividad moderada.

Factores que determinan el riesgo de erosión

En relación con el potencial del escorrimiento (Figura 5a), se encontró que la ZM_1 presentó el mayor potencial de escorrimiento, con diferencias altamente significativas respecto del resto de las zonas de la ladera. No se identificaron diferencias significativas entre la ZC y la ZA, ni entre la ZA y las ZM_2 y ZM_3 . La ZC solo se diferenció con la ZM_1 y la ZB. Estas variaciones pueden atribuirse a la granulometría y al grado de desarrollo de la estructura del suelo.

| Zona de la ladera | IP | Productividad del suelo |
|-------------------|---------|-------------------------|
| Z. Cultivo | 0,563 a | Muy alto |
| Z. Alta | 0,259 b | Moderado |
| Z. Media 1 | 0,012 c | Baja |
| Z. Media 2 | 0,078 c | Baja |
| Z. Media 3 | 0,087 c | Baja |
| Z. Bajo | 0,247 b | Moderado |

Al evaluar el factor η , correspondiente al impacto de la topografía en el riesgo de erosión (Figura 5b), se observaron diferencias altamente significativas entre la ZC y las demás zonas, de modo que las áreas con mayor impacto por topografía al riesgo de erosión fueron las zonas de la parte media de la ladera. No se encontraron diferencias significativas entre las ZA y ZB por estar ubicadas en el mismo rango de pendiente.

Para el factor β , que evalúa la agresividad relativa de la lluvia, no se registraron diferencias, dado que la precipitación anual y las medias mensuales fueron iguales en todas las zonas. El valor obtenido del índice de Fournier de 26,50, se clasificó como bajo, lo que resultó en un valor de 0,6150 para el factor β .

El mismo comportamiento se observó para el factor ε , que mide la influencia climática de lluvias y vientos, debido a que la orientación de la pendiente fue la misma en todas las zonas, siendo la orientación de 124° sureste, con un valor en el factor ε de 0,3125.

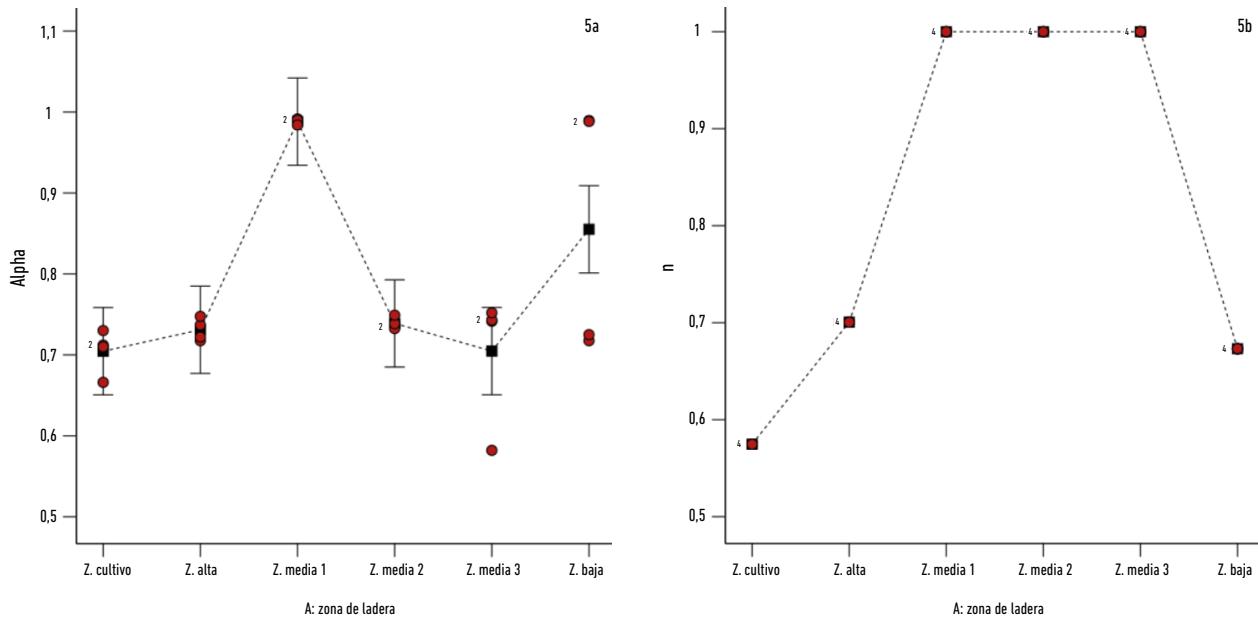


Figura 5. Factores que determinan el IRE. a) Factor de potencial del escurrimiento; b) Factor de impacto de la topografía.

Índice de riesgo de erosión (IRE) en la ladera bajo estudio

Se encontraron diferencias altamente significativas en las zonas de ladera ($P < 0,0001$) respecto del IRE (Figura 6). La ZC presentó el menor riesgo de erosión, con diferencias significativas frente a las otras cinco zonas

expuestas a procesos de degradación. En las zonas medianas de la ladera se registró el mayor riesgo de erosión, con diferencias significativas, destacando la ZM₁ con el valor más alto (con diferencias altamente significativas). La ZC mostró un riesgo de erosión bajo, al igual que la ZA y la ZB. Las demás zonas presentaron un riesgo de erosión moderado.

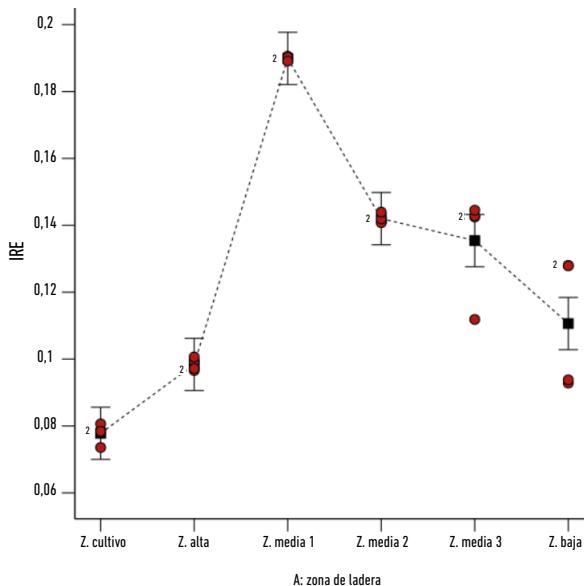


Figura 6. Índice de Riesgo de Erosión (IRE) en la ladera bajo estudio.

| Zona de la ladera | Valor de IRE | Riesgo de erosión |
|-------------------|--------------|-------------------|
| Z. Cultivo | 0,08 d | Bajo |
| Z. Alta | 0,10 c | Bajo |
| Z. Media 1 | 0,19 a | Moderado |
| Z. Media 2 | 0,14 b | Moderado |
| Z. Media 3 | 0,13 b | Moderado |
| Z. Bajo | 0,10 c | Bajo |

Discusión

La erosión hídrica constituye una gran amenaza para la seguridad alimentaria y la viabilidad de los ecosistemas, ya que las tasas actuales son órdenes de magnitud más altas que las de la formación natural de los suelos. Paralelamente, el aumento de la población y los ingresos hace cada vez más difícil satisfacer la demanda mundial de productos agrícolas y servicios ecosistémicos (Wuepper, Borrelli y Finger 2020).

La evaluación de los impactos de la erosión hídrica en la productividad de tierras agrícolas se ha realizado principalmente a través de los cambios en los rendimientos de los cultivos; sin embargo, es importante considerar las modificaciones que ocurren en la zona de enraizamiento, las cuales pueden estimarse mediante la valoración de cualidades del suelo y del clima, como lo proponen el IP y el IRE. Esto ha permitido, en esta investigación, identificar de manera clara la afectación en la capacidad de aireación, los incrementos en la densidad aparente, la pérdida de materia orgánica y de profundidad efectiva del suelo, así como la influencia de la topografía, la agresividad relativa de la lluvia y el potencial de escurrimiento dado por las pendientes. Investigaciones como las de Sambodo, Setiawan y Rokhmaningtyas (2018), utilizando un IP modificado, encontraron que las características que más determinaban los cambios en la productividad eran el contenido de arcilla, la materia orgánica, el pH, el contenido de agua disponible y la profundidad. Por su parte, Agber y Anjembe (2012) hallaron una alta correlación entre el IP y el rendimiento de maíz y sorgo.

La capacidad de aireación del suelo determina la disponibilidad de oxígeno, lo cual es fundamental para el desarrollo óptimo de las plantas, ya que se requiere en diferentes procesos metabólicos prioritarios, entre los que se destacan el metabolismo de carbohidratos, la reducción de nitratos, la fijación simbiótica de nitrógeno, la síntesis y renovación de proteínas, así como la absorción de nutrientes por las raíces (Morard, Lacoste y Silvestre 1995; Shahien, Abuarab y Magdy 2014; Toro y Pinto 2015). En la ladera bajo estudio, la mayor capacidad de aireación se obtuvo en la zona de cultivo, con un suelo de textura franca, valores bajos de densidad aparente y el mayor contenido de materia orgánica. En contraste, en la parte media de la ladera, cuyos suelos presentan un mayor contenido de arcilla —debido probablemente a la pérdida de la capa superficial—, menores contenidos de materia orgánica y una estructura débil, se evidencia una

menor capacidad de aireación, especialmente en la zona media 1. Allí se alcanzan valores limitantes de densidad aparente para el desarrollo de raíces, en función de la textura (Delgado 1989).

Estas condiciones de degradación del suelo por efecto de la erosión hídrica, que conducen al aumento de la densidad aparente y a la disminución de la materia orgánica, generan un deterioro en la productividad (Lobo, Lozano y Delgado 2005; Rabot et ál. 2018). Esto se evidencia en la ladera bajo estudio, ya que las zonas con los valores más bajos de materia orgánica y mayor densidad aparente se asocian con los menores niveles de productividad.

La disminución o pérdida de la profundidad efectiva del suelo afecta su capacidad para la producción de cultivos, lo cual se relaciona con la reducción del volumen disponible para la exploración de raíces, la disminución de la capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes, entre otros efectos negativos (Hincapié-Gómez y Salazar-Gutiérrez 2011; Gu et ál. 2018; Zhang et ál. 2021), especialmente cuando afloran horizontes con limitaciones para el desarrollo agrícola (Lobo, Lozano y Delgado 2005). En la ladera bajo estudio se evidencia la presencia de impedimentos mecánicos para el desarrollo radicular en la zona media, producto del efecto degradativo de los movimientos en masa, que se incrementa con la pendiente en comparación con los suelos de las zonas alta y baja.

La zona de cultivo no afectada por los movimientos en masa fue la de mayor índice de productividad siendo esta de capacidad productiva muy alta, además de un riesgo de erosión bajo.

De acuerdo con los criterios de Delgado (1997) y Delgado y López (1998), el uso agrícola en la zona alta y baja de la ladera debe ser limitado y selectivo, adecuado únicamente para ciertos cultivos, como sistemas agroforestales, plantaciones forestales o cultivos intercalados, implementando prácticas orientadas a disminuir el escurrimiento superficial. En contraste, para las zonas de mayor pendiente (ZM_1 , ZM_2 y ZM_3), que recibieron la calificación más baja, se concluye que no es recomendable la agricultura. Al presentar la mayor inclinación de la ladera, requieren protocolos para mejorar la infiltración del agua y controlar la erosión hídrica. Así mismo, estos suelos demandan prácticas intensivas de manejo para recuperar la productividad (Lagos 2005), como la aplicación de abonos verdes y orgánicos que favorezcan el desarrollo de gramíneas, arbustos y especies forestales, con el propósito de conservar coberturas permanentes y rehabilitar estas áreas.

Conclusiones

El índice de productividad permitió clasificar las diferentes zonas de la ladera bajo estudio según su capacidad productiva. De igual manera, el índice de riesgo de erosión mostró la vulnerabilidad de los suelos a los procesos erosivos, lo que evidencia que ambos índices constituyen herramientas útiles para el diagnóstico de laderas, el establecimiento de medidas de rehabilitación y el desarrollo de alternativas sostenibles de producción orientadas al manejo adecuado del recurso suelo.

Los valores de suficiencia de las propiedades del suelo empleados en esta investigación —como la capacidad de aireación, la textura, la densidad aparente, la profundidad de raíces, la pendiente del terreno y el pH— pueden utilizarse para cuantificar los efectos de la erosión sobre la productividad de los suelos.

La estimación de los impactos negativos de la erosión sobre la capacidad productiva de los suelos, así como del riesgo de ocurrencia, resulta de gran importancia para la toma de decisiones en torno al uso y manejo sostenible del recurso suelo, así como para la formulación e implementación de políticas orientadas a la gestión sostenible de los recursos naturales.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al semillero del Grupo de Investigación NOVA del Centro de Desarrollo Agroempresarial y Turístico del Huila.

Referencias

- Agber, P. I. y Bemgba C. Anjembe. 2012. "Testing the Effectiveness of Soil Productivity Index (PI) Model for Selected Soils in Makurdi, Nigeria". *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science* 7 (11): 927-932.
- Ajon, Abraham, T., P. I. Agber y A. Ali. 2018. "Evaluation of Soil Erosion Effects on Soil Productivity Using Productivity Index Model in Makurdi, Benue State, Nigeria". *World Journal of Research and Review* 7 (2): 26-31.
- Bako Tanko, Ezekiel Ambo Mamai y Akila Bardey Istifanus. 2021. "Determination of the Effects of Tillage on the Productivity of a Sandy Loam Soil Using Soil Productivity Models". *Research in Agricultural Engineering* 67 (3): 108-115. <https://doi.org/10.17221/46/2020-RAE>
- Blake, G. R. y K. H. Hartge. 1986. "Bulk Density". En *Methods of Soil Analysis, Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, editado por Arnold Klute, 363-382. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- Daniels, R. B., J. W. Gilliam, D. K. Cassel y L. A. Nelson. 1985. "Soil Erosion Class and Landscape Position in the North Carolina Piedmont". *Soil Science Society of America Journal* 49 (4): 991-995. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900040040x>
- Day, P. R. 1965. "Particle Fractionation and Particle-Size Analysis". En: *Methods of Soil Analysis*, editado por Arnod Klute, 545-562. Madison: American Society of Agronomy –Soil Science Society of America, Madison.
- Delgado, Fernando. 1997. *Sistema para la evaluación de tierras agrícolas y prioridades de conservación de suelos en áreas montañosas tropicales. Un enfoque metodológico*. Mérida: CIDIAT
- Delgado, Fernando y Roberto López. 1998. "Evaluation of Soil Development Impact on the Productivity of Venezuelan Soils". *Advances in GeoEcology* 31 (1): 133-142.
- Dengiz, Orhan. 2007. "Assessment of Soil Productivity and Erosion Status for the Ankara-Sogulca Catchment Using GIS". *International Journal of Soil Science* 2 (1): 15-28. <https://scialert.net/abstract/?doi=ijss.2007.15.28>
- Dengiz, Orhan, Hesna Ozcan, E. Selim Koksal, Oguz Baskan y Yakup Kosker. 2010. "Sustainable Natural Resource Management and Environmental Assessment in the Salt Lake (Tuz Golu) Specially Protected Area". *Environmental Monitoring and Assessment* 161: 327-342. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0749-4>
- Díaz, Jesús, José A. Moreno, Miguel Larreal, Luis Mármol, Raquel Rodríguez e Iván Chirinos. 2009. "Aplicación de un índice de productividad en dos unidades de suelo y su relación con el cultivo de sorgo. Baja Guajira, municipio Páez, estado Zulia, Venezuela". *Revista UDO Agrícola* 9 (4): 893-900.
- El-Nady, Manal A. 2015. "Evaluation of the Productivity of Two Soils Using Productivity Index". *Egyptian Journal of Soil Science* 55 (2): 171-184. <https://doi.org/10.21608/ejss.2015.314>
- El-Swaify, Samir y J.H. Fownes. 1989. "Erosion Processes and Models: Applications in the Tropic". En *Erosion, Conservation, and Small-Scale Farming*. Editado por Hans Hurni y Kebede Tato, 135-149. Bern: Geographica Bernensis.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1985. *Guidelines: Land Evaluation for Irrigated Agriculture*. FAO Soils Bulletin 55. Roma: FAO.
- Forsythe, Warren. 1975. *Física de suelos. Manual de laboratorio*. San José: Editorial IICA.
- Fournier, Frédéric. 1960. *Climat et érosion. La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques*. París: Presses Universitaires de France.
- Gee, G. W. y Bauder, J. W. 1986. "Particle-Size Analysis". En: *Methods of Soil Analysis*, editado por Arnod Klute, 383-411.

- Madison: American Society of Agronomy –Soil Science Society of America, Madison.
- Gobernación del Huila. "Mapa del Huila". 5 de septiembre de 2024. <https://www.huila.gov.co/publicaciones/152/mapa-del-huila/>
- Gu, Zhijia, Yun Xie, Yuan Gao, Xiaoyu Ren, Congcong Cheng y Sichu Wang. 2018. "Quantitative Assessment of Soil Productivity and Predicted Impacts of Water Erosion in the Black Soil Region of Northeastern China". *Science of The Total Environment* 637-638 (1): 706-716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.061>
- Hacisalihoglu, Sezgin, Ercan Oktan y Zafer Yucesan. 2010. "Predicting Soil Erosion in Oriental Spruce (*Picea orientalis* (L.) link.) Stands in Eastern black Sea Region of Turkey". *African Journal of Agricultural Research* 5 (16): 2200-2214. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.613>
- Halecki, Wiktor y Slawomir Klatka. 2021. "Application of Soil Productivity Index After Eight Years of Soil Reclamation with Sewage Sludge Amendments". *Environmental Management* 67: 822-832. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01422-1>
- Hincapié-Gómez, Edgar y Luis Fernando Salazar-Gutiérrez. 2011. "Impacto de la erosión sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y la producción de café". *Revista Cenicafé* 62 (2): 79-89.
- ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación). 2006. "NTC 5403:2021. Calidad del suelo. Determinación del carbono orgánico Calidad de Suelo. Determinación del Carbono Orgánico". Consultado el 25 de mayo de 2022. <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-suelo-determinacion-del-carbono-organico-ntc5403-2021.html>
- ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación). 2008. "NTC 5264:2018. Calidad del suelo. Determinación del pH". Consultado el 25 de mayo de 2022. <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-suelo-determinacion-del-ph-ntc5264-2018.html>
- IDEAM, MADS y UDCA. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales). 2015. *Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia 2015*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2006. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Kiniry Laurie Neill, C. L. Scrivner y M. E. Keener. 1983. *A Soil Productivity Index Based Upon Predicted Water Depletion and Root Growth*. Research Bulletin. Columbia: University of Missouri-Columbia.
- Lagos, Mario. 2005. *Protocolo para selección de alternativas para la conservación de suelos en laderas*. Ministerio de Agricultura.
- Santiago de Chile: División de Protección de los Recursos Naturales Renovables, Servicio Agrícola y Ganadero. Consultado el 20 de septiembre de 2025. https://www.sag.cl/sites/default/files/PROTOCOLO_SELECCION.pdf
- Lal, Rattan. 2001. "Soil Degradation by Erosion". *Land Degradation and Development* 12 (6): 519-539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
- Lobo, Deyanira. 1990. "Pérdidas de agua, suelo y nutrientes en un Alfisol de Chaguaramas, estado Guárico, bajo diferentes coberturas". *Agronomía Tropical* 40 (1-3): 79-89.
- Lobo, Deyanira, Zenaida Lozano y Fernando Delgado. 2005. "Water Erosion Risk Assessment and Impact on Productivity of a Venezuelan Soil". *CATENA* 64 (2-3): 297-306. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.011>
- Mejía, Joel Francisco y Mauricio Vera Morales. 2002. "Evaluación de la productividad y el riesgo de erosión como base para el manejo sostenible de los suelos, en la microcuenca del río Zarzales, estado Mérida-Venezuela". *Revista Geográfica Venezolana* 43 (2): 237-254.
- Morard, Philippe, Ludovic Lacoste y Jérôme Silvestre. 1995. "Effect of Oxygen Deficiency on Uptake of Water and Mineral Nutrients by Tomato Plants in Soilless Culture". *Journal of Plant Nutrition* 23 (8): 1063-1078. <https://doi.org/10.1080/01904160009382082>
- Mueller, Lothar, Uwe Schindler, Wilfried Mirschel, T. Graham Shepherd, Bruce C. Ball, Katharina Helming, Jutta Rogasik, Frank Eulenstein y Hubert Wiggering. 2010. "Assessing the Productivity Function of Soils. A Review". *Agronomy for Sustainable Development* 30 (3): 601-614. <https://doi.org/10.1051/agro/2009057>
- Pierce, F. J., W. E. Larson, R. H. Dowdy y W. A. P. Graham. 1983. "Productivity of Soils: Assessing Long-Term Changes Due to Erosion". *Journal of Soil and Water Conservation* 38 (1): 39-44. <https://doi.org/10.1080/00224561.1983.12436244>
- Pineda Neida M., Edgar José Jaimes, B. Hidalgo, José Gregorio Mendoza, Jhon González e Hilda Rodríguez. 2009. "Clasificación de tierras agrícolas con fines de conservación de suelos en parcelas de uso hortícola, subcuenca Alto Mota-tán, Mérida-Venezuela" *Revista de la Facultad de Agronomía* 26 (4): 532-554.
- Pla Sentís, Ildefonso. 1983. "Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales". *Revista de la Facultad de Agronomía, Alcance*, no. 32, 1-91.
- Poesen, Jean. 2018. "Soil Erosion in the Anthropocene: Research Needs". *Earth Surface Processes and Landforms* 43 (1): 64-84. <https://doi.org/10.1002/esp.4250>
- Rabot, Éva, Martin Wiesmeier, Steffen Schlüter y Hans Jörg Vogel. 2018. "Soil Structure as an Indicator of Soil Functions:

- A Review". *Geoderma* 314: 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Rodríguez, Oscar Simón. 2018. *Conservación de Suelos y Agua: una premisa del desarrollo sustentable*. Caracas: Universidad Central de Venezuela, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.
- Sambodo, A. P., M. A. Setiawan y Rusma Prima Rokhmaningtyas. 2018. "The Evaluation of Modified Productivity Index Method on the Transitional Volcanic-Tropical Landscape". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 200: 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/200/1/012011>
- Shahien, Mohamed M., M. E. Abuarab y E. Magdy. 2014. "Root Aeration Improves Yield and Water Use Efficiency of Irrigated Potato in Sandy Clay Loam Soil". *International Journal of Advanced Research* 2 (10): 310-320. <https://doi.org/10.21608/mjae.2014.98397>
- Toro, Guillermo y Manuel Pinto. 2015. "Plant Respiration under Low Oxygen". *Chilean Journal of Agricultural Research* 75: 57-70. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392015000300007>
- Wuepper, David, Pasquale Borrelli y Robert Finger. 2020. "Countries and the Global Rate of Soil Erosion". *Nature Sustainability* 3 (1): 51-55. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0438-4>
- Zhang, B., Yuanming Zhang, Deli Chen, Robert Edwin White y Yong Li. 2004. "A Quantitative Evaluation System of Soil Productivity for Intensive Agriculture in China". *Geoderma* 123 (3-4): 319-331. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.02.015>
- Zhang, Lanlan, Yong Huang, Li Rong, Xingwu Duan, Ruihuan Zhang, Yawen Li y Jian Guan. 2021. "Effect of Soil Erosion Depth on Crop Yield Based on Topsoil Removal Method: A Meta-Analysis". *Agronomy for Sustainable Development* 41: 63. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00718-8>
- Ziblim Imoro Abukari, Daniel Okai-Anti y E. Augustine Asmah. 2012. "Productivity Index Rating of Some Soils in the Tolon/Kumbungu District of the Northern Region of Ghana". *Journal of Soil Science and Environmental Management* 3 (6): 154-163. <https://doi.org/10.5897/JSSEM11.124>

Daniel Rodríguez Acosta

Ingeniero Forestal, especialista técnico en Elaboración de Bioinsumos, magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental y doctor en Agroindustria y Producción Agrícola Sostenible por la Universidad Surcolombiana. Cuenta con amplia experiencia en investigación aplicada al manejo de suelos, rehabilitación ecológica y agroindustria sostenible. Actualmente se desempeña como instructor e investigador en el SENA, donde lidera proyectos en edafología, rehabilitación de suelos y sostenibilidad ambiental, contribuyendo al desarrollo rural y a la seguridad alimentaria.

Deyanira Lobo Luján

Ingeniera Agrónoma, magíster y doctora en Ciencia del Suelo por la Universidad Central de Venezuela (ucv). Docente jubilada activa de la Facultad de Agronomía de la ucv en las áreas de edafología, física de suelos, manejo y conservación de suelos y evaluación de tierras. Ha sido profesora invitada en universidades y centros de investigación de América Latina y Europa. Es autora de más de 120 publicaciones científicas arbitradas y ha recibido reconocimientos y premios nacionales e internacionales. Ha dirigido trabajos de pregrado, tesis de maestría y ha sido tutora o cotutora de tesis doctorales.

Armando Torrente Trujillo

Ingeniero Agrícola, magíster en Suelos y Aguas y doctor en Ciencias Agropecuarias. Desde 1983 es profesor titular de la Universidad Surcolombiana e integrante del Grupo de Investigación Hidroingeniería y Desarrollo Agropecuario. Está vinculado a los programas académicos de Ingeniería Agrícola, Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, y coordina el doctorado en Agroindustria y Desarrollo Agrícola Sostenible. Es director del Comité Regional de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Ha participado en múltiples investigaciones relacionadas con el manejo del recurso suelo y agua en la agricultura.