



Pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca río Estibaná, Panamá*

Soil loss due to water erosion in the Estibaná River sub-basin, Panama

Jorge Alberto Castro-Villarreal¹, José Ezequiel Villarreal-Núñez², Juan Adriano Cabrera-Rodríguez²

* Recepción: 6 de mayo, 2024. Aceptación: 13 de agosto, 2024. Tesis para optar al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas del primer autor, financiada por Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá y recursos propios.

¹ Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) Herrera, Panamá. jacastrovilla@gmail.com (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0009-0001-4779-2725>); jevilla38@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1317-1960>).

² Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). Mayabeque, Cuba. naniadriano1950@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-0850-9050>).

Resumen

Introducción. La degradación del suelo se desarrolla de forma natural a pequeña escala, sin embargo, la intervención del hombre la ha acelerado y maximizado. La erosión es uno de los principales procesos vinculados a la degradación, esta aunada a sistemas de explotación no adaptados al medio ambiente son la base para la reducción de la productividad y la contaminación de los cuerpos de agua. En Panamá, la degradación de suelo afecta 20 787 km², área que abarca zonas donde se concentra gran parte de la producción agropecuaria del país. **Objetivo.** Determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca río Estibaná mediante la implementación de parcelas de erosión. **Materiales y métodos.** La investigación se desarrolló en la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá (Arco Seco), durante la época lluviosa (mayo – diciembre) de los años 2020 y 2021. Se utilizó la metodología de parcelas de erosión, con el empleo de un diseño de bloques completos al azar (BCA), en tres localidades, se evaluaron tres tratamientos, con tres repeticiones, donde se determinó escorrentía total, masa de sedimentos transportados (suspendido y precipitado), se realizó un ANDEVA multifactorial. **Resultados.** La erosión fue influenciada por factores como pendiente, cobertura del suelo y precipitación. Se determinó que la erosión ascendió a 62,98 Mg/ha/año en suelo desnudo en pendientes de 10 %, con barreras vivas y cobertura del suelo se mitigó el daño por erosión, el comportamiento en otras pendientes presentó un comportamiento similar. **Conclusiones.** La variación de las precipitaciones en frecuencia, intensidad, duración; así como las intervenciones antrópicas en el medio natural, son los principales causantes del incremento de la pérdida de suelo dentro de la subcuenca río Estibaná. La implementación de labores de conservación de bajo costo puede mitigar el efecto erosivo de la escorrentía superficial.

Palabras clave: pérdida de suelo, cobertura, escorrentía, sedimentos, contaminación ambiental.

Abstract

Introduction. Soil degradation develops naturally on a small scale, however, human intervention has accelerated and maximized it. Erosion is one of the main processes linked to degradation; this, combined with exploitation systems not adapted to the environment, is the basis for the reduction of productivity and pollution of water bodies. In Panama, soil degradation affects 20,787 km², an area that covers areas where much of the country's agricultural production



is concentrated. **Objective.** To determine soil loss due to water erosion in the Estibaná River sub-basin through the implementation of erosion plots. **Materials and methods.** The research was carried out in the Estibaná River sub-basin, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama (Arco Seco), during the rainy season (May – December) of the years 2020 and 2021. The methodology of erosion plots was used, using a Random Complete Block (BCA) design, in three locations, evaluating three treatments, with three repetitions, where total runoff, mass of transported sediments (suspended and precipitated), a Multifactorial ANOVA was performed. **Results.** Erosion was influenced by factors such as slope, soil cover and precipitation. It was determined that erosion amounted to 62.98 Mg/ha/year in bare soil on 10 % slopes, introducing living barriers and soil cover mitigated erosion damage, the behavior on other slopes presented a similar behavior. **Conclusions.** The variation of precipitation in frequency, intensity, duration; as well as anthropogenic interventions in the natural environment, are the main causes of the increase in soil loss within the Estibaná River sub-basin. The implementation of low-cost conservation efforts can mitigate the erosive effect of surface runoff.

Keywords: soil loss, cover, runoff, sediments, environmental contamination.

Introducción

El suelo es el principal elemento para el funcionamiento de cualquier ecosistema, aporta el soporte y los nutrientes a los cultivos y a la cobertura forestal, además cumple otras funciones como ente de filtrado y regulador del agua; en él se realizan los ciclos biogeoquímicos esenciales para el reciclaje de nutrientes (Bailon Linares, 2023). Aun con la importancia que tiene este elemento natural, se encuentra bajo una creciente presión debido a la implementación de patrones insostenibles de producción y consumo (Bailon Linares, 2023).

La erosión se considera el problema más significativo de la degradación de los suelos a nivel mundial, esta provoca graves impactos al medio ambiente y elevados costos económicos debido a los efectos que causa en la producción agrícola, la infraestructura y la calidad de vida de la población (Nájera González et al., 2016). El 25 % de la superficie terrestre presenta altos niveles de degradación, cada década se pierden 120 millones de hectáreas por la degradación del suelo (Molina & Lozano, 2016).

La cuantificación y zonificación de la pérdida de suelo es fundamental para la implementación de mejores prácticas de conservación, por cuanto se estima que, a escala planetaria, la degradación del suelo por actividades antropogénicas supera los 2000 millones de hectáreas, de las cuales alrededor de 1100 millones son por erosión hídrica (Ganasri & Ramesh, 2016).

La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce la disgregación, transporte y depósito de las partículas del suelo por la acción de la energía cinética de la lluvia, escorrentía en movimiento y la gravedad (Cisneros et al., 2012). Debido a los efectos tangibles de la erosión se ha establecido el término *tasa tolerable de pérdida de suelo* (T^2), la cual se define como el “*máximo nivel de erosión del suelo que permite un elevado nivel de productividad del cultivo, sostenible económicamente e indefinidamente*”. Se acepta que el valor para T^2 es de 11,0 Mg/ha/año, debido a la proximidad de este valor con la tasa máxima de desarrollo del horizonte bajo condiciones óptimas (León Peláez, 2003).

En los suelos desnudos la lluvia rompe los agregados del suelo y produce fenómenos como el encostramiento del suelo y el sellado de los macroporos, esto provoca la disminución de la capacidad de infiltración y el aumento de la escorrentía, aunado al efecto de la pendiente es la fórmula para un problema erosivo. En la cuenca del río Salado en Argentina se destacaron los efectos negativos irreversibles del sellado del suelo, incluida la impermeabilización (García Alvarado et al., 2020) y se enfatizó que el sellado y la compactación superficial son muy importantes para

la capacidad de infiltración del suelo (Cerquera et al., 2010). El efecto de estos procesos en el suelo incrementa la escorrentía superficial y la probabilidad de que se den eventos erosivos importantes, al reducir la capacidad de infiltración de suelo.

Los procesos de erosión hídrica están regidos por factores como volumen e intensidad de las lluvias, pendiente, tipo de cobertura, falta de prácticas de conservación de suelos y las características físicas del suelo (Álvarez Tiellasuca, 2020), ya que se requiere la ruptura de los agregados y que se sobrepase la capacidad de infiltración de los suelos, para que se genere el fenómeno de escorrentía superficial. El volumen e intensidad de las lluvias son factores críticos que no se puede controlar y estas aunadas a las pendientes pueden llegar a provocar flujos superficiales con capacidad erosiva.

Los análisis de la relación erosión del suelo – productividad sugieren que una pérdida media de 0,3 % del rendimiento anual de los cultivos ocurre por la erosión de los suelos. De llegar a mantenerse esta tasa en el futuro, una reducción del 10 % del rendimiento potencial podría ocurrir para el 2050; esto puede ser equivalente a la eliminación de 150 millones de hectáreas de suelo de cultivo o a 4,5 millones de hectáreas por año (Pennock & McKenzie, 2015).

Las investigaciones dirigidas a calcular la pérdida de suelo por efecto de la erosión hídrica *in situ* requieren de una fuerte inversión de recursos económicos y técnicos, las mismas son complicadas debido a que requieren realizar varias tomas de datos en la zona de estudio y se debe tomar en consideración la accesibilidad de área.

La tasa de erosión en Panamá es alta. Para el año 1960 el total de suelos erosionados era de 500 000 ha. En 1970 las áreas erosionadas cubrían unas 748 000 ha y un total de 2 018 000 ha erosionadas en 1987 (Ruíz Morales, 2017).

La degradación de los suelos es un proceso creciente y acumulativo, en la actualidad hay una superficie de 20 787,57 km² (27 % del territorio nacional) afectada por algún proceso de degradación (Mejía et al., 2023). La evaluación mundial de la degradación de las tierras para América Latina y el Caribe (GLADA), estimó que en Panamá la pérdida de suelo fue de 14 millones de toneladas al año, con un costo estimado de \$10.00 ha/año, lo que representa un total de 140 millones de dólares o 0,90 % de PIB (Mejía et al., 2023).

Se determinó que en suelos Ultisoles en cultivo de piña, la pérdida por erosión hídrica fue de 4,28 Mg/ha, en parcelas de siembra convencional con uso de barreras vivas de hierba limón (*Cymbopogon citratus*), 13,72 Mg/ha para siembra convencional y 200,08 Mg/ha para suelos desnudos (Mejía Gutiérrez, 2018). En el distrito de Tierras Altas se evaluó la pérdida de suelo en campos de cultivo con pendientes entre 30 % – 50% y se determinó una tasa de erosión entre 64,50 – 344,0 Mg/ha, mientras que en áreas boscosas con pendientes entre 30 % – 40 % la pérdida de suelo fue de 0,78 – 1,47 Mg/ha (Happ, 2014).

La conservación del suelo es fundamental en la agricultura moderna, ya que la degradación del suelo puede tener impactos negativos en la productividad agrícola y en el medio ambiente. En la actualidad existen una amplia variedad de técnicas de conservación de suelos, la selección de una o más de estas, está relacionado con el recurso económico disponible. Basado en el costo de las actividades de conservación las más accesible a los agricultores son la que requieren poca o ninguna mecanización del terreno, entre las cuales están: siembra en contorno, coberturas muertas (Mulch), barreras vivas o muestras.

El establecimiento de una barrera viva está en función de la pendiente del terreno, en suelos con pendiente de 2,0 % las barreras vivas se colocan cada 30,5 m, mientras que en pendiente de 10,0 % las barreras se deben colocar cada 12,2 m y en pendientes de 15,0 % las barreras se colocan cada 9,7 m (Cubero, 1999).

En Panamá se han identificado cuatro áreas que se encuentran sometidas a procesos de sequía y degradación de suelos, estas son conocidas como, Arco Seco, Cerro Punta, Comarca Ngöbe Buglé, Sabana Veraguense. Arco Seco (Coclé, Herrera y Los Santos) se encuentra en la costa del océano Pacífico, que representa tierras dedicadas a la producción agropecuaria; siendo la producción de granos básicos (arroz y maíz) y la ganadería (carne y leche) en explotaciones extensivas I (Autoridad Nacional del Ambiente [ANAM], 2009).

Arco Seco está afectado por el uso inadecuado del recurso suelo, que aumenta los riesgos de erosión, sin embargo, no se han realizado investigaciones orientadas a determinar la pérdida de suelo dentro de esta zona. Debido a esto se estableció el objetivo de determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca río Estibaná mediante la implementación de parcelas de erosión.

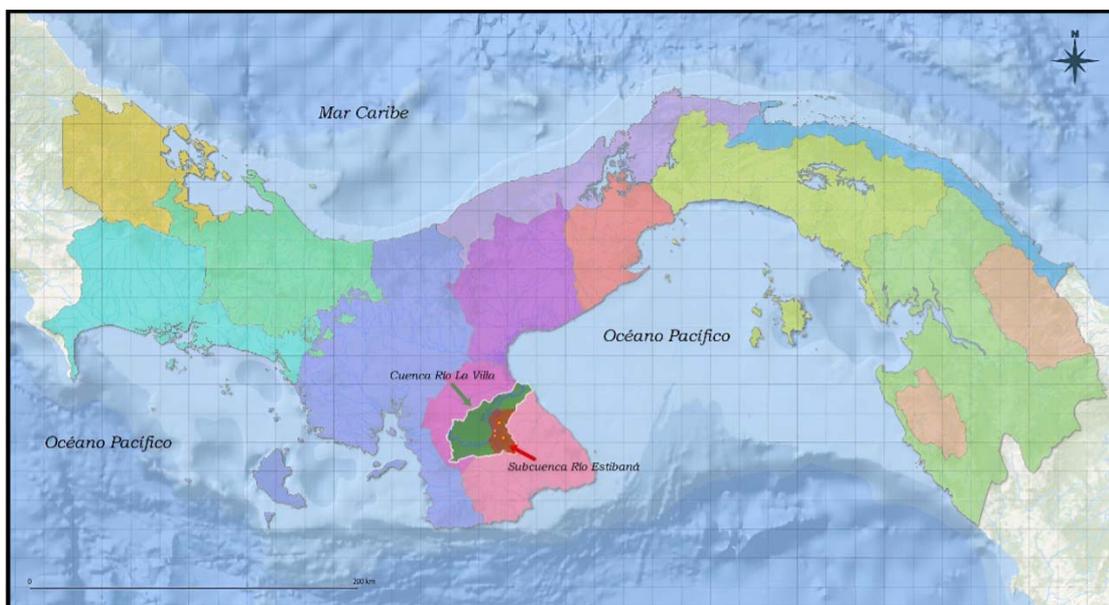


Figura 1. Ubicación general de la cuenca río La Villa con respecto a la República de Panamá, adjunto subcuenca río Estibaná.

Figure 1. General location of the La Villa River basin with respect to the Republic of Panama, attached Estibana River subbasin.

Materiales y métodos

Ubicación

La investigación se desarrolló en fincas de productores colaboradores del Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) dentro de la subcuenca río Estibaná en la provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá; durante la época lluviosa (mayo – diciembre) de 2020 y 2021 (Figura 2).

La subcuenca según las zonas de vida de Holdridge se clasifica como bosque seco tropical, con precipitaciones entre 1000 – 1500 mm/año y una evapotranspiración potencial entre 1300 – 1350 mm/año (ANAM, 2009). Presenta una configuración orográfica con predominancia de colinas de baja altitud y sabanas, con pendientes entre leves y moderadas (ANAM, 2013).

Durante el estudio se evaluó la pérdida de suelo por escorrentía superficial en tres porcentajes de pendiente representativas de la subcuenca (2,5 % - 4,4 % - 10,0 %), en cada pendiente se estableció una parcela de escorrentía con tres repeticiones y tres tratamientos: sin cobertura (SC), sin cobertura + barrera viva (SC+BV) y cobertura natural (CN) (Cuadro 1). Las parcelas de experimentales se ubicaron en fincas pecuarias, las mismas poseían pasturas mejoras (*B. brizantha*). Se seleccionó áreas con una cobertura igual o superior al 95 %, la cual se determinó mediante el método del cuadrante y para las parcelas que requerían no tener cobertura se eliminó la cobertura de

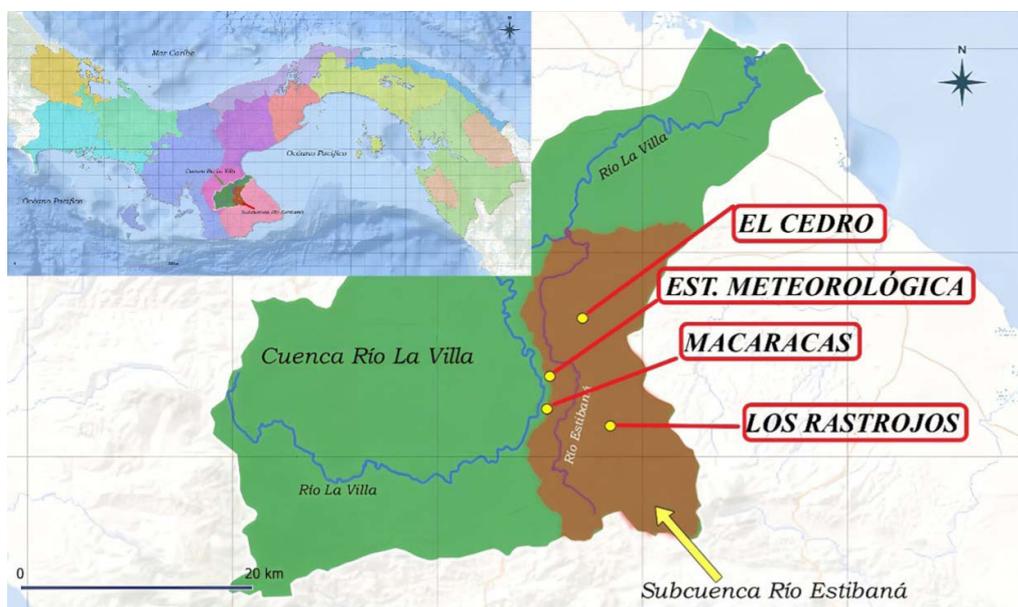


Figura 2. Ubicación geográfica de la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, Arco Seco, Panamá. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá IDIAP, 2023.

Figure 2. Geographic location of the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Arco Seco, Panama. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, 2023.

forma manual y con el uso de herbicidas sistémicos. La barrera viva que se evaluó fue de vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), la cual se ubicó a 1,0 m del colector de sedimentos, a una distancia entre plantas de 0,20 m.

Cuadro 1. Datos generales de las localidades evaluadas en la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. 2020 – 2021.

Table 1. General data of the localities evaluated in the Estibana River sub-basin 2020 - 2021. Province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama.

Loc.	Elevación (m s. n. m.)	Coordenadas		Cob. del suelo	S (%)	M.O. (%)	
		N	O			SC	CN
Macaracas	118,0	7°42'59,9"	80°33'15,6"	Pasto	2,50	1,65	2,08
Los Rastrojos	112,0	7°42'167"	80°30'19,2"	Pasto	4,40	1,65	2,30
El Cedro	138,0	7°47'19,0"	80°31'36,9"	Pasto	10,0	1,14	2,64

Loc.: localidades; N: norte; O: oeste; S: pendiente; SC: sin cobertura; CN: cobertura natural. / Traducción!!

Caracterización de suelos y pendiente

Para la caracterización de los suelos se seleccionaron pruebas fisicoquímicas con el objeto de determinar las características de los suelos que estaban relacionadas con la erosión. Se determinó el contenido de materia orgánica

del suelo por el método Walkley & Black (1934) de digestión húmeda con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido sulfúrico (H_2SO_4). Se evaluó el grado de compactación del suelo mediante el método del cilindro para determinar la densidad de volumen. También, se estimó la textura del suelo mediante el método de Bouyoucos y los resultados se interpretaron a través del triángulo textural del USDA.

En las localidades seleccionadas se determinó el comportamiento de la infiltración del suelo, por medio del infiltrómetro de doble anillo en suelos con cobertura natural y en suelos desnudos. La prueba se desarrolló con un tiempo acumulado de 205 min. Se midió la pendiente del terreno mediante un método matemático basado en la distancia y la diferencia de elevación entre dos puntos conocidos, para ello se utilizó cinta métrica, estacas, hilo y nivel de burbuja.

Mediciones pluviométricas

En cada localidad evaluada se instaló un pluviómetro totalizador a cargo de colaboradores residentes en cerca de la parcela de investigación, al cual se le tomaban lecturas cada 12 h (6:00 am – 6:00 pm), este se instaló en una zona despejada de 10,0 m de radio y a una altura de 1,50 m.

Tratamientos

Durante el desarrollo de esta investigación se evaluaron tres tratamientos, sin cobertura (SC), que consistió en la eliminación de la cobertura vegetal mediante controles manuales y el uso de herbicidas sistémicas; sin cobertura + barrera viva (SC+BV), esta se basó en la eliminación de la cobertura del suelo con base en la misma metodología del tratamiento SC, con la variante de utilizar una barrera viva de vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en la parte inferior de la parcela a 1,0 m del colector de escorrentía; y cobertura natural (CN) que contempló mantener la cobertura natural del terreno de pastura mejorada (*B. brizantha*).

Parcelas de escorrentía

El método utilizado para el establecimiento de las parcelas de escorrentía fue el propuesto por Da Veiga & Do Prado (1993), por el cual se establecieron nueve parcelas de área conocida ($22,35 \text{ m}^2$) en cada una de las zonas seleccionadas. Estas parcelas fueron aisladas con barreras de láminas de polietileno de 0,30 m de altura, y en la parte baja de la parcela se colocó un colector metálico para recoger el agua de escorrentía y el material erosionado. Este colector se conectaba con un sistema de almacenamiento para cada tratamiento compuesto por dos bidones metálicos de $0,21 \text{ m}^3$ (Figura 2).

Volumen de escorrentía

Se determinó el volumen total de la escorrentía en cada una de las localidades bajo estudio, para ello se recuperó el efluente de cada parcela, esto se realizó mediante un colector y un sistema de almacenamiento compuesto de dos bidones de $0,21 \text{ m}^3$, el segundo bidón contaba con un sistema de fraccionamiento que permitía colectar la tercera parte de la escorrentía que salía del primer envase de almacenamiento. Se determinó el volumen total de escorrentía ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) para cada tratamiento en las diferentes localidades evaluadas dentro de la subcuenca río Estibaná

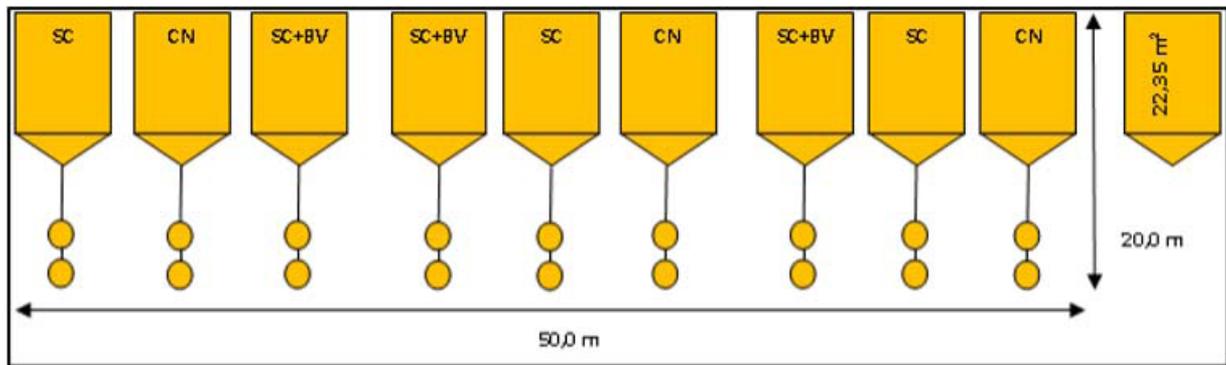


Figura 3. Esquema utilizado para la instalación de las parcelas de escorrentía en la subcuenca río Estibaná, mayo – diciembre 2020 – 2021. Provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá.

SC: sin cobertura, SC+BV: sin cobertura + barrera viva, CN: cobertura natural.

Figure 3. The scheme used for the installation of runoff plots in the Estibana River subbasin, May – December 2020 – 2021. Province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama.

SC: without cover, SC+BV: without cover + living barrier, CN: natural cover.

Toma y procesamiento de muestras

Los muestreos se realizaron con intervalos de 15 días, si las condiciones climáticas lo justificaban el intervalo se redujo para evitar la pérdida de la escorrentía almacenada. Durante los mismos se tomaron muestras por duplicado de agua de escorrentía, sedimentos gruesos, se midió el volumen de escorrentía y la masa de sedimentos húmedos.

Las muestras de agua de escorrentía se sedimentaron por decantación, luego se filtró el producto y se secaron a 105 °C hasta peso constante y luego se determinó la masa de sedimentos suspendidos. Se tomaron muestras duplicadas de sedimento grueso húmedo, se secaron bajo los mismos parámetros antes descritos y se obtuvo la masa de sedimentos grueso.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar (BCA) con tres repeticiones. Los datos que se presentaron son el producto de dos ciclos de tomas de datos, los cuales fueron en la época lluviosa de los años 2020 y 2021. A los datos obtenidos se les aplicó un análisis de varianza (ANDEVA) multifactorial, este se realizó con el paquete estadístico Statgraphic Centurion XVI (StanPoint Technologies, Inc., 2009).

Resultados

Precipitación pluvial y Escorrentía superficial 2020 – 2021

Las precipitaciones dentro de la subcuenca no fueron homogéneas durante todo el año, se observó que la época lluviosa comenzó en abril y se extendió hasta diciembre, siendo los meses con mayor precipitación los comprendidos entre agosto y noviembre (Figura 4), para la época lluviosa 2020; durante el análisis de los datos de escorrentía superficial se encontró que hubo diferencias entre los años en que se realizó la toma de datos. Y se determinó que esta diferencia se anidaba en la variación de las precipitaciones ocurridas en los dos años evaluados (Figura 5).

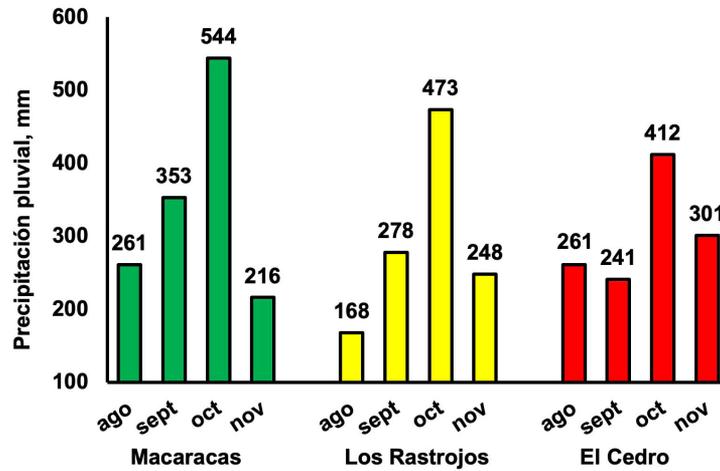


Figura 4. Precipitación pluvial total de los meses más lluviosos en las áreas evaluadas dentro de la subcuenca río Estibaná durante la época lluviosa, 2020. Provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá.

Figure 4. Total rainfall of the rainiest months in the evaluated areas within the Estibana River sub-basin during the rainy season, 2020. Province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama.

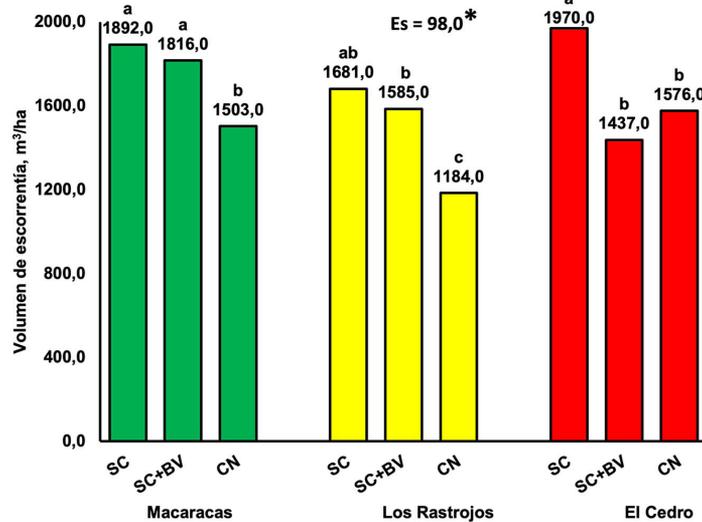


Figura 5. Volumen de escorrentía registrada en cada localidad investigada de la subcuenca río Estibaná en dependencia del tratamiento ensayado, 2020. Provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá.

* Nivel de significancia obtenido en ANDEVA ($p < 0,05$). ^{ab} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos. SC: sin cobertura, SC+BV: sin cobertura + barrera viva, CN: cobertura natural.

Figure 5. Volume of runoff recorded in each investigated location of the Estibaná River sub-basin depending on the treatment tested, 2020. Province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama.

* Significance level obtained in ANOVA ($p < 0,05$). ^{ab} Letters within the graph represent homogeneous groups. SC: No cover, SC+BV: No cover + living barrier, CN = Natural cover.

Para ciclo de lluvias de 2021 los meses más lluviosos fueron mayo, junio, agosto, octubre y noviembre (Figura 6); se determinó mediante el análisis de los datos que la escorrentía superficial en las localidades evaluadas está relacionada con las precipitaciones ocurridas y encontró diferencia entre los tratamientos evaluados (Figura 7). Durante las épocas lluviosas evaluadas, las localidades recibieron precipitaciones totales entre 1500 – 2100 mm anuales.

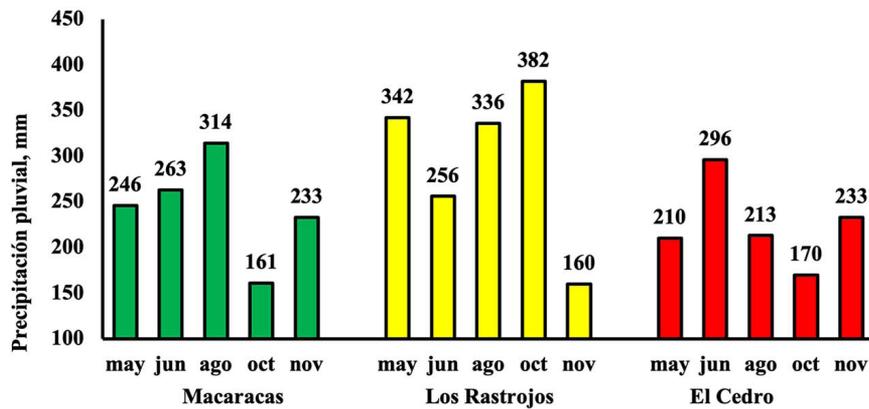


Figura 6. Precipitaciones pluviales registradas durante los meses de mayor ocurrencia en las localidades investigadas de la subcuenca río Estibaná, 2021. Provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá.

Figure 6. Rainfall recorded during the months of greatest occurrence in the investigated localities of the Estibaná River sub-basin, 2021. Province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama.

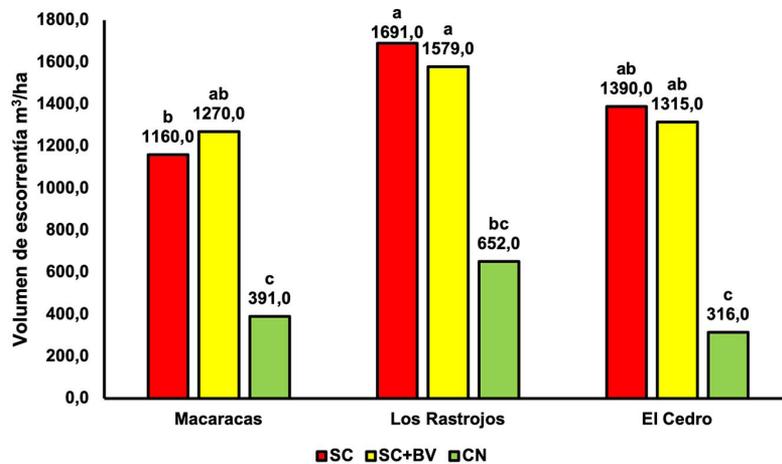


Figura 7. Volumen de escorrentía registrada en cada localidad investigada de la subcuenca río Estibaná en dependencia del tratamiento ensayado, 2021. Provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá.

* Nivel de significancia obtenido en ANDEVA ($p < 0,05$). ^{abc} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos. SC: sin cobertura, SC+BV: sin cobertura + barrera viva, CN: cobertura natural.

Figure 7. Volume of runoff recorded in each investigated location of the Estibaná River subbasin depending on the treatment tested, 2021. Province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama.* Significance level obtained in ANOVA ($p < 0.05$).

^{abc} Letters within the graph represent homogeneous groups. SC: No cover, SC+BV: No cover + living barrier, CN: Natural cover.

Durante el periodo comprendido entre los meses de abril a diciembre de la época lluviosa de 2020 se registró el 99,87 % de las precipitaciones, mientras que para el mismo periodo de la época lluviosa de 2021 se registró el 97,0 % de las lluvias. Los meses más lluviosos en la zona de estudio fueron los comprendidos entre julio – noviembre, donde para el ciclo 2020 llovieron el 71,5 % y para el ciclo 2021 cayó el 58,4 % de la precipitación total.

Características de suelos evaluados

Se determinó que las tres localidades seleccionadas cumplían con el criterio de tener porcentajes de pendientes que fueran representativos de la orografía de la subcuenca río Estibaná. Los valores de contenido de materia orgánica del suelo fueron considerados como pobres (<2 %) lo que coincide con los reportado para los suelos de la región de Azuero por Villarreal et al. (2013), la densidad aparente de los suelos presentó valores que se clasifican como normales para la clase textural de los suelos evaluados y al ser esta un referente a la compactación de los suelos, se determinó que los suelos no sufren problemas graves de compactación en sus horizontes superficiales; con el análisis de datos de materia orgánica y densidad aparente, se determinó que para la densidad no hay diferencia entre las localidades y para el contenido de materia orgánica se encontró diferencia entre las localidades (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores determinados para las variables de caracterización de los suelos evaluados en la subcuenca río Estibaná, 2020 – 2021. Provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá.

Table 2. Values determined for the characterization variables of the soils evaluated in the Estibaná River subbasin, 2020 – 2021. Province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama.

Localidad	Pendiente (%)	Tratamiento	M.O. (%)	D.A. (g.cm ⁻³)
El Cedro	10,0	SC	2,28 ^{ab}	1,19
		CN	2,67 ^a	0,98
Los Rastrojos	4,40	SC	0,89 ^c	1,04
		CN	1,22 ^{bc}	0,97
Macaracas	2,50	SC	1,44 ^{bc}	0,93
		CN	1,60 ^{abc}	0,93

M.O. (%): materia orgánica, D.A. (g.cm⁻³): densidad aparente, SC: sin cobertura, CN: cobertura natural. ^{abc} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos (p<0,05).

M.O. (%): organic matter, D.A. (g.cm⁻³): apparent density, SC: no cover, CN: natural cover. ^{abc} Letters within the graph represent homogeneous groups (p<0.05).

Capacidad de infiltración del suelo

La infiltración de agua en los suelos está influenciada por varios factores, como la resistencia de la capa superficial del suelo a la penetración del agua al inicio de la precipitación, la cobertura del suelo y los tratamientos superficiales del suelo. En las localidades evaluadas dentro de la subcuenca río Estibaná se observó que los suelos sin cobertura vegetal (SC) presentaron una menor capacidad de infiltración promedio que los mismos suelos bajo cobertura natural (CN), esto fue un indicador importante sobre el efecto que tiene la cobertura en la capacidad de infiltración del suelo. Se observó que la infiltración cuando el suelo se mantuvo desnudo, fue menor con el aumento de la pendiente, con inclinaciones del terreno entre 8 y 20 %, lo que sugiere que la pendiente del terreno provoca este efecto (Figura 8).

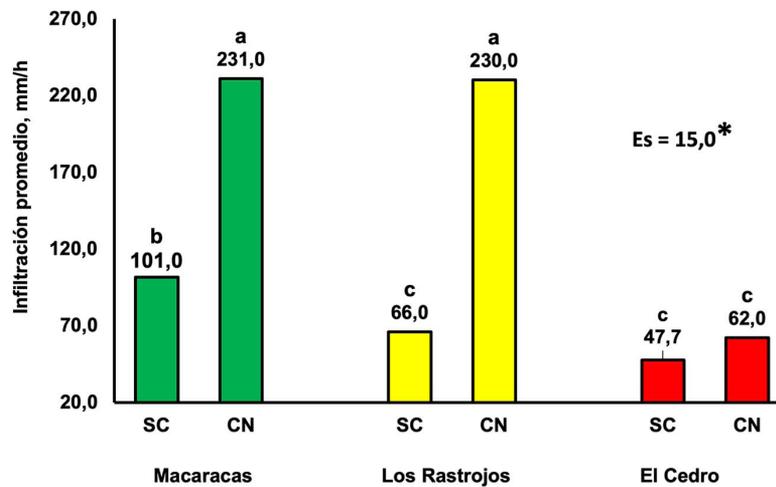


Figura 8. Infiltración promedio del suelo en las localidades evaluadas en la subcuenca río Estibaná, 2020 - 2021. Provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá.

* Nivel de significancia obtenido en ANDEVA ($p < 0,05$). ^{abc} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos. SC: sin cobertura, CN: cobertura natural.

Figure 8. Average soil infiltration in the locations evaluated in the Estibana River sub-basin, 2020 - 2021. Province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama.

* Significance level obtained in ANOVA ($p < 0,05$). ^{abc} Letters within the graph represent homogeneous groups. SC: no cover, CN: natural cover.

Pérdida de suelo

Durante el periodo lluvioso (mayo – diciembre) de 2020, se observó que la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en la subcuenca río Estibaná fue influenciada por la pendiente, el estado de cobertura del suelo y las precipitaciones. Los datos de masa total de suelo erosionado en las localidades de Los Rastrojos y Macaracas mostraron una mayor pérdida de suelo bajo el tratamiento de SC+BV, atribuido al laboreo realizado durante la instalación de las parcelas de escorrentía. En la localidad de El Cedro, no se observó este efecto debido a que el proceso de instalación de las parcelas requirió de un menor laboreo del terreno (Figura 9).

Se observó que la pérdida de suelo durante la época lluviosa 2020 en los tratamientos evaluados en localidad de Macaracas no presentó diferencia con respecto a la pérdida de suelo de las otras localidades (Los Rastrojos y El Cedro) cuando se aplicó el tratamiento CN, las mayores pérdidas de suelo se presentaron bajo los tratamientos SC+BV y SC en las localidades de Los Rastrojos y El Cedro (Figura 9). En El Cedro donde la pendiente del suelo ascendía a 10,0 %, durante el 2020 se determinó que la mayor pérdida de suelo fue en las parcelas bajo tratamiento sin cobertura con 12,40 Mg/ha/año, en la misma localidad con el empleo de una barrera viva se observó una disminución de 25,5 % (3,16 Mg/ha/año), en cuanto al efecto de la cobertura natural redujo la erosión en 87,9 % (10,90 Mg/ha/año).

Durante la época lluviosa de 2021 no se presentó diferencia en la pérdida de suelo entre las localidades de Macaracas y Los Rastrojos bajo ninguno de los tratamientos evaluados. En la localidad del El Cedro se observó que bajo los tratamientos SC y SC+BV, la pérdida de suelo fue superior a la producida en las otras localidades bajo los mismos tratamientos (Figura 10). Con base en la tasa tolerable de pérdida de suelo (11,0 Mg/ha/año), se determinó que en la localidad de Los Rastrojos los suelos bajo el tratamiento SC superan la tasa tolerable y se

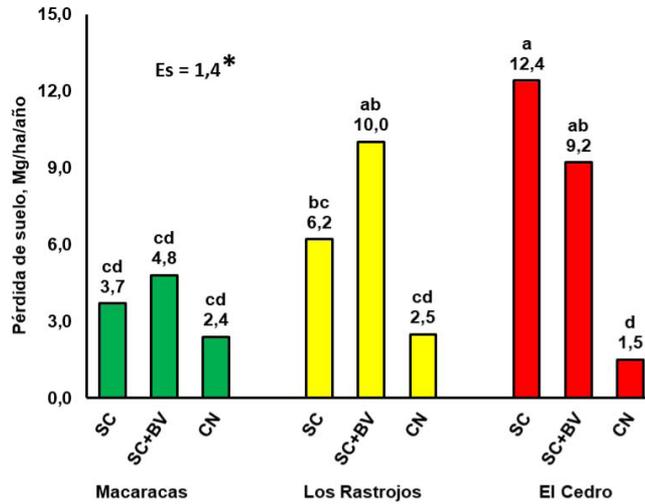


Figura 9. Pérdida de suelo en las localidades evaluadas según el tratamiento empleado en la subcuenca río Estibaná, 2020. Provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá.

* Nivel de significancia obtenido en ANDEVA ($p < 0,05$). ^{abcd} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos. SC: sin cobertura, SC+BV: sin cobertura + barrera viva, CN: cobertura natural.

Figure 9. Soil loss in the localities evaluated according to the treatment used in the Estibaná River sub-basin, 2020. Province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama.

* Significance level obtained in ANOVA ($p < 0,05$). ^{abcd} Letters within the graph represent homogeneous groups. SC: no cover, SC+BV: no cover + living barrier, CN: natural cover.

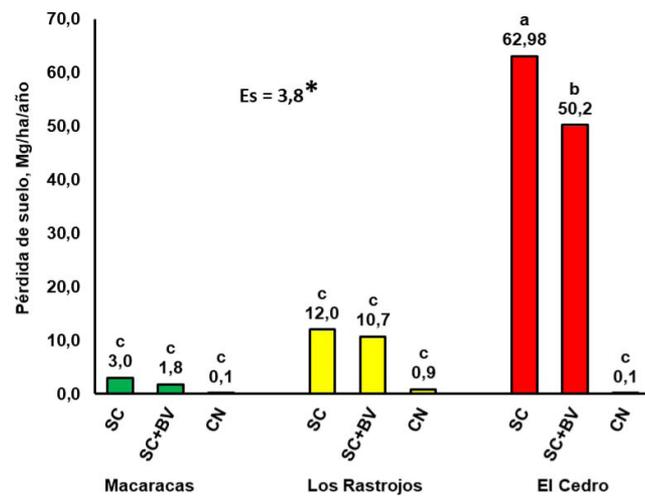


Figura 10. Pérdida de suelo en las localidades evaluadas según el tratamiento empleado en la subcuenca río Estibaná, 2021. Provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá.

* Nivel de significancia obtenido en ADEVA ($p < 0,05$). ^{abc} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos. SC: sin cobertura, SC+BV: sin cobertura + barrera viva, CN: cobertura natural.

Figure 10. Soil loss in the localities evaluated according to the treatment used in the Estibaná River sub-basin, 2021. Province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama.

* Significance level obtained in ANOVA ($p < 0,05$). ^{abc} Letters within the graph represent homogeneous groups. SC: no cover, SC+BV: no cover + living barrier, CN: natural cover.

consideró que son suelos en riego. Por otro lado, en El Cedro se observó que los suelos bajo los tratamientos SC y SC+BV presentaron una pérdida de suelo elevada y se valoró que son suelos que bajo estos manejos presentan un alto riesgo de degradación por erosión hídrica. Se determinó que la localidad de Macaracas no presentó valores de erosión que se consideraran perjudiciales para el suelo, ya que bajo el tratamiento SC la pérdida fue de 3,0 Mg/ha/año, con una mitigación del 41,3 % (1,24 Mg/ha/año) cuando se implementó el uso de barreras vivas y del 97,6 % (2,93 Mg/ha/año) cuando se mantuvo una adecuada cobertura vegetal del suelo. En Los Rastrojos se observó que bajo el tratamiento SC la pérdida de suelo fue de 12,0 Mg/ha/año, mediante la implementación de barreras vivas se logró reducir la erosión en 10,8 % (1,30 Mg/ha/año) y con una adecuada cobertura vegetal sobre el suelo se logró mitigar la pérdida en 92,5 % (11,1 Mg/ha/año). Para la localidad de El Cedro la pérdida de suelo bajo el tratamiento SC fue de 62,98 Mg/ha/año, y con una barrera viva se redujo la pérdida de suelo en 20,3 % (12,78 Mg/ha/año) y al mantener la cobertura vegetal de suelo se mitigó la erosión en 99,84 % (62,88 Mg/ha/año).

La implementación de barreras vivas si bien produjo un efecto al mitigar la pérdida de suelo en las localidades evaluadas, este no fue muy efectivo en reducir la erosión a valores aceptables, es por ello que se hace patente que la implementación de barreras vivas debe ir asociado con barreras muertas temporales que protejan el suelo de la erosión, mientras se logra el adecuado establecimiento de la barrera viva.

Discusión

La península de Azuero, ubicada en la costa pacífica de Panamá, se caracteriza por tener un clima tropical de sabana con un promedio anual de precipitación de 1,054 mm (Abrego-Bonilla, 2023). Dentro de esta península se encuentra ubicada la subcuenca río Estibaná, para el ciclo lluvioso de 2020 se determinó que las mayores pérdidas de suelo ocurrieron en los suelos desnudos con pendientes de 10 % (El Cedro), sin embargo, no se encontró diferencia entre los tratamientos: SC = sin cobertura, SC+BV = sin cobertura + barrera viva, en las localidades de Los Rastrojos y El Cedro (Figura 9). Durante la época lluviosa de 2021 se mantuvo la tendencia en la pérdida de suelo, donde la mayor pérdida se presentó en los suelos bajo tratamiento SC y SC+BV con pendientes de 10 % (Figura 10). El efecto erosivo de las precipitaciones se presentó con mayor intensidad en los tratamientos SC, donde no existía cobertura del suelo, esto se debió a que estos al estar desprotegidos del efecto disgregante de las gotas de lluvia fueron más afectados. Otros autores reportaron que la pérdida de vegetación, ya sea por actividades urbanas, agrícolas o deforestación, puede agravar la erosión hídrica al disminuir la capacidad del suelo para retener la humedad y protegerse de la acción erosiva del agua (Zhou et al., 2017).

La subcuenca río Estibaná fue clasificada como una cuenca pequeña para las dimensiones geográficas de Panamá, dentro de ella se encontró poca diferencia en cuanto a la textura del suelo, densidad aparente, contenido de materia orgánica (Cuadro 2), se determinó que los suelos estudiados pertenecen a los grupos texturales franco o franco arcillosos, esto debido a que comparten el mismo tipo de material parental, son suelos pobres en materia orgánica derivado de décadas de un manejo inadecuado y a la deforestación para hacer espacio a la agricultura y la ganadería (ANAM, 2009).

Durante la evaluación de capacidad de infiltración se observó que los suelos con cobertura natural presentaron una mayor capacidad de infiltración (Figura 8), esto debido a la presencia de macro poros y una buena agregación del suelo. La presencia de macroporos en el suelo es crucial para facilitar la infiltración de agua, el crecimiento de las raíces y el intercambio de aire (Gómez, 2020).

Las precipitaciones en Panamá responden a una estacionalidad climática, donde se presenta una época seca y una época lluviosa bien definida a lo largo del año, la dependencia de la producción agropecuaria de las precipitaciones es un aspecto crítico de la sostenibilidad agroalimentaria del país (ANAM, 2013), ya que en el territorio nacional son pocas las zonas que cuentan con sistemas de riego diseñados para proveer el recurso hídrico

necesario para el desarrollo de los cultivos durante todo el año; el sistema de producción es la siembra estacional, la cual depende de las precipitaciones pluviales. Lo cual hace al sistema productivo nacional susceptible a los efectos del cambio climático y a eventos como los fenómenos del niño y la niña.

La región de la península de Azuero fue catalogada como una de las zonas más secas de Panamá, la misma forma parte del Arco Seco y está contemplada entre las tierras secas y degradadas de Panamá (ANAM, 2009). Se observó que en la subcuenca las primeras lluvias iniciaron el mes de abril y se extendieron hasta diciembre, los registros pluviométricos medidos en la subcuenca río Estibaná mostraron que los meses más lluviosos fueron los comprendidos entre agosto y noviembre (Figuras 4 y 6). Los análisis de datos mostraron que la presencia de una adecuada cobertura vegetal del suelo fue capaz de reducir el volumen de escorrentía superficial.

Las prácticas de conservación y un manejo adecuado de la cobertura del suelo, son actividades fundamentales del manejo de suelos para mitigar los efectos erosivos de la escorrentía. Las prácticas de conservación pueden romper la continuidad de la pendiente y disminuir la velocidad de la escorrentía; mientras que el adecuado manejo de la cobertura del suelo puede actuar como una barrera física que reduce la velocidad de las gotas de lluvia y por ende, se mitigó la disgregación de los agregados del suelo.

La interacción de los factores antes mencionados subraya la importancia de una gestión integral del recurso suelo que considere las condiciones naturales y las intervenciones humanas, para mitigar la magnitud y la severidad de los procesos erosivos.

Se observó que el proceso de escorrentía no se produce desde el inicio de las lluvias, esto se debió al bajo contenido de humedad en las capas superficiales del suelo que absorben las precipitaciones sin que se den efectos erosivos apreciables, resultados similares reportaron García Ruiz et al. (2013) sobre el comportamiento de las primeras lluvias después del verano (época seca) y su impacto sobre la escorrentía, el estudio destacó que las primeras precipitaciones fueron absorbidas sin generar cambios significativos en la superficie del suelo.

En la subcuenca río Estibaná se observó que las precipitaciones iniciaron en abril – mayo, sin embargo, la escorrentía fue apreciable a partir de junio, ya que las primeras precipitaciones fueron infiltradas con facilidad por el suelo, debido a baja humedad retenida por el suelo producto de la estación seca.

El volumen de escorrentía observado en la subcuenca presentó diferencia durante los dos ciclos lluviosos evaluados. Este comportamiento se debió a variabilidad en las precipitaciones que se presentó en las épocas lluviosas de 2020 y 2021. Otros autores han mencionado que la variabilidad climática y los cambios subyacentes en la superficie están asociados con las alteraciones de la escorrentía (Xin et al., 2021). También se ha reportado que el comportamiento de la escorrentía superficial en microcuencas andinas con regímenes de precipitación y cobertura diferentes mostraron variaciones en el flujo superficial, esto indicó una influencia de la precipitación y la cobertura en la dinámica de la escorrentía (Martínez et al., 2017).

El análisis de los datos mostró que la presencia de una adecuada cobertura vegetal (CN) mermó el volumen de escorrentía superficial en comparación con los tratamientos SC y SC+BV (Figura 5 y 7). Se ha observado que cambios en la cobertura y uso del suelo pueden condicionar el escurrimiento superficial, y afectan la humedad del suelo, la evapotranspiración natural y la generación de escorrentía (García et al., 2018). Los suelos con una adecuada cobertura vegetal presentan una buena proporción de poros, los cuales favorecen la infiltración y por consiguiente, disminuyen la escorrentía superficial.

Conclusiones

El volumen de la escorrentía, el arrastre de sedimentos y la magnitud de la erosión fueron determinados por las precipitaciones, la pendiente, la cobertura y las propiedades físicas del suelo. La escorrentía, la erosión del suelo se hicieron mayores en la medida que aumentó la pendiente del terreno y el suelo pierde su cobertura. La utilización

de sistemas de manejo con coberturas apropiadas del suelo, fue la mejor alternativa para mitigar la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. La aplicación del método de parcelas de erosión fue una buena alternativa para determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica en una región determinada, ya que permitió la toma de datos a largo plazo y con diferentes sistemas de manejo.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto de Innovaciones Agropecuarias de Panamá (IDIAP) por financiar esta investigación y la orientación técnica. También al Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) Cuba, por la orientación técnica.

Referencias

- Abrego-Bonilla, J. & Guccione, M. (2023). Rol de la precipitación en la cuenca del río Guararé (costa pacífica de Panamá), 1981 – 2020. En L. Morales Maure, B. Zachrisson Salamina, & J. Sánchez Galán (Eds.), *XIX Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología. APANAC 2023. Panamá, Hub de las ciencias. Libro del congreso*, (pp. 175-182). Asociación Panameña para el Avance de la Ciencia. <https://doi.org/10.33412/apanac.2023.3932>
- Álvarez Ticllasuca, A. (2020). Análisis temporal del nivel de la erosión hídrica de la subcuenca del río ichu 2013 y 2017. *Tayacaja*, 3(2) 7-21. <https://doi.org/10.46908/riect.v3i2.97>
- Autoridad Nacional del Ambiente. (2013). *Diagnóstico ambiental participativo de la subcuenca río Estibaná*. Editorial ANAM.
- Autoridad Nacional del Ambiente. (2009). *Atlas de tierras secas y degradadas de Panamá*. Editorial ANAM. <https://www.sinia.gob.pa/index.php/atlas-ambientales>
- Bailon Linares, J. (2023). *Análisis de las prácticas de conservación de suelos para la evaluación de la erosión hídrica en la subcuenca Presa Jalpan* [Tesis de maestría, no publicada]. Universidad de Querétaro.
- Cerquera, Y. A., López, G. A., & Ramos, L. J. (2010). Diseño de un sistema electrónico digital para automatizar la prueba de capacidad de infiltración del suelo en campo. *Ingeniería y Región*, 7, 45-56. <https://doi.org/10.25054/22161325.799>
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero, A., González, J., Reynero, M., Diez, A., & Degioanni, A. (2012). *Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo*. UniRío.
- Cubero, D. (1999, octubre 18-22). Las barreras vivas y su aplicación en la agricultura conservacionista. [Conferencia No. 67] In F. Bertsch Hernández (Ed.), *Memoria del XI Concurso Nacional Agronómico / III Congreso Nacional de Suelos* (pp. 3-10). EUNED. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a50-6907-III.pdf>
- Da Veiga, M., & Do Prado, W. (1993). *Manual para la instalación y conducción de experimentos de pérdida de suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ganasri, B. P., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953-961. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>
- García Alvarado, J. M., Pérez González, M. E., & García Rodríguez, M. P. (2020). Sellado de suelos, fragmentación y conectividad ecológica en la conurbación de Madrid (España). *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, 85, Artículo 2884. <https://doi.org/10.21138/bage.2884>

- García Ruiz, J. M., Martí Bono, C., Arnáez Vadillo, J., Beguería Portugués, S., Lorente Grima, A., & Seeger, M. (2013). Las cuencas experimentales de Arnás y San Salvador en el Pirineo Central Español: escorrentía y transporte de sedimento. *Cuadernos De Investigación Geográfica*, 26, 23-40. <https://doi.org/10.18172/cig.1061>
- García, P., Badano, N., Menéndez, Á., Bert, F., García, G., Podestá, G., Rovere, S., Verdín, A., Rajagopalan, R., & Arora, P. (2018). Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. caso de estudio: cuenca del río Salado, Buenos Aires, Argentina. *Ribagua*, 5(2), 92-106. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1495990>
- Happ, M. (2014). *Impacts of land-cover change and high rainfall on soil erosion among three farms in Cerro Punta, Chiriquí, Panamá*. School for International Training Digital Collections. https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/2002
- León Peláez, J. D. (2003). Métodos experimentales para el seguimiento y estudio de la erosión hídrica. *Gestión y Ambiente*, 6(1), 39-56. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/89005/75544>
- Martínez, E., Coello, C., & Feyen, J. (2017). Análisis comparativo del comportamiento de la corriente de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal. *Maskana*, 8(1), 129-144. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.01.12>
- Mejía Gutiérrez, J. I. (2018). *Evaluación de la pérdida de suelo y nutrientes por erosión hídrica en el cultivo de piña en La Chorrera, Panamá Oeste* [Disertación de maestría, Universidad de Panamá]. Repositorio Institucional Digital de la Universidad de Panamá. <https://up-rid.up.ac.pa/1419/>
- Mejía, J. I., Valdés, E., & De La Cruz, G. (2023). Erosión hídrica y uso de barreras vivas en el cultivo de piña. *Ciencia Agropecuaria*, (37), 62-88. <http://revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/616>
- Molina, L. D. C., & Lozano, L. P. (2016). La desertificación del suelo, aspectos y estrategias de lucha. *Publicaciones e Investigación*, 10, 117-127. <https://doi.org/10.22490/25394088.1591>
- Nájera González, O., Bojórquez Serrano, J. I., Flores Vilchez, F., Murray Núñez, R. M., & González García-Sancho, A. (2016). Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. *Cultivos Tropicales*, 37(2), 45-55. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3942.5527>
- Pennock, D., & McKenzie, N. (2015). *Estado mundial del recurso suelo* (Resumen Técnico). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ruíz Morales, G. (2017). La erosión de los suelos en Panamá y sus impactos. *El Tecnológico*, 28(1), 14-16. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/el-tecnologico/article/view/2116>
- Villarreal, J., Name, B., & García, R. (2013). Zonificación de suelos de Panamá en base a niveles de nutrientes. *Ciencia Agropecuaria*, (21), 71-89. <http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/184>
- Xin, J., Sun, X., Liu, L., Li, H., Liu, X., Li, X., & Xu, Z. (2021). Quantifying the contribution of climate and underlying surface changes to alpine runoff alterations associated with glacier melting. *Hydrological Processes*, 35(3) Article e14069. <https://doi.org/10.1002/hyp.14069>
- Zhou, H., Pan, X., & Zhou, W. (2017). Assessing spatial distribution of soil erosion in a karst region in southwestern china: a case study in jinpo mountains. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 52, Article 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/52/1/012047>