

Respuesta de la erosión a la variabilidad de la precipitación y los usos del suelo en
ecosistemas altoandinos

Yohani Humberto Peña Jaimes, Nicolás López Barajas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Forestal

Director

Diego Suescún Carvajal

MSc. Bosques y Conservación Ambiental

Codirector

Juan Diego León Peláez

PhD. Manejo y Conservación de Recursos Naturales

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional de Educación a Distancia IPRED

Programa Ingeniería Forestal

Bucaramanga, Santander

2026

Dedicatoria



"La naturaleza no hace nada incompleto, ni nada en vano." – Aristóteles

Agradecimientos

Las palabras se quedan cortas, y no alcanzan para poder expresar nuestro sentimiento de agradecimiento. No obstante, queremos agradecer de manera pública a las personas y a la Universidad Industrial de Santander que han forjado nuestro caminar en esta bonita carrera llamada ingeniería forestal.

Primeramente, a Dios, por darnos la vida, la salud y la sabiduría. Gracias por la fuerza de levantarnos en los momentos difíciles y por poner en nuestro camino a las personas correctas para hacer esta meta realidad.

A nuestro profesor y director de tesis Diego Suescún Carvajal y a nuestro codirector Juan Diego León Peláez, por hacernos partícipes de este proyecto, por su acompañamiento y guía por las ciencias forestales. A su vez agradecer a otros profesores como Ronald Alfonso Montañez, Doris Duarte, Sandra Milena Díaz López, Ricardo Oviedo y Cristian Molina, agradecerles a ellos por todas sus enseñanzas, dedicación y asesorías a lo largo de nuestro vivir en la carrera.

A nuestras familias, por ser el pilar fundamental de nuestras vidas. Agradecemos su sacrificio incondicional, su paciencia infinita y ese apoyo moral que nunca flaqueó. Este logro no es solo nuestro, sino también de quienes creyeron en nosotros desde el primer día y nos impulsaron a alcanzar nuestras metas. A nuestros amigos y compañeros, con quienes compartimos el día a día de este proceso. Gracias por los debates, el apoyo mutuo en los momentos de incertidumbre y por hacer de la vida universitaria una experiencia inolvidable. Su presencia fue el aliento necesario para llegar a la meta.

Finalmente, y no menos importante, a los propietarios de las fincas, Familia Vega (Robledal), Familia Ibañez (Plantación), Profesor Eduardo Moreno (Pastizal), Ingeniera Sara

María Fernanda Ramírez (SAF) Álvaro Ortiz (Cultivo permanente). Lugares en donde pudimos realizar la medición de datos para nuestro proyecto cada sábado, infinitas gracias por brindarnos las facilidades para cumplir con las labores de campo. A don Donaldo Jaimes Parra, por su gran servicio en el transporte de nosotros y de los materiales de campo en cada uno de estos sitios, sin importar las condiciones climáticas y de carretera, su energía y actitud por colaborar estará impregnada siempre en nosotros.

Tabla de contenido

	Pág
Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo general	15
2. Marco teórico	16
2.1 Ecosistema altoandino.....	16
2.2 Cambio climático	17
2.3 Precipitación.....	17
2.4 Interceptación del dosel.....	18
2.5 Precipitación interna.....	19
2.6 Escorrentía superficial.....	19
2.7 Erosión	20
3. Materiales y métodos	21
3.1 Área de estudio.....	21
3.2 Coberturas vegetales/usos del suelo.....	23
3.3 Caracterización fisicoquímica de los suelos	24
3.4 Diseño experimental.....	26
3.5 Monitoreo en campo	28
3.7 Procesamiento de datos.....	29
4. Resultados y discusión	31
4.1 Caracterización de la precipitación	31
4.2 Interceptación del dosel.....	33

4.3 Precipitación interna.....	35
4.3.1 Escala semanal	35
4.3.2 Precipitación interna en escala mensual.....	36
4.4 Relaciones precipitación, escorrentía y erosión	37
4.4.1 Escala semanal	38
4.4.2 Escala mensual	41
4.5 Interacciones multivariadas entre la precipitación, la escorrentía y la erosión.....	43
4.6 Dinámica de la relación precipitación-escorrentía-erosión por cobertura vegetal	45
4.7 Modelación de la respuesta hidrológica superficial y factores disparadores de la escorrentía.....	46
4.8 Influencia del tipo de cobertura en la magnitud de la pérdida de suelo por erosión.....	50
4.9 Variabilidad de la tasa específica de erosión según el tipo de cobertura	51
4.10 Capacitación rural en prácticas agrícolas sostenibles.....	53
5. Conclusiones	53
6. Recomendaciones	55
Referencias Bibliográficas	57
Apéndices	66

Lista de Tablas

	Pág
Tabla 1 Propiedades físicas y químicas de los suelos para las cinco coberturas vegetales evaluadas	25
Tabla 2 Valores semanales de erosión hídrica (Er) y escorrentía superficial (Es).....	38
Tabla 3 Tabla de Autovalores	43
Tabla 4 Correlaciones por cobertura	46
Tabla 5 Modelos de regresión lineal simple.....	47
Tabla 6 Resultados del análisis de varianza para la variable erosión hídrica (kg/ha/semana) en respuesta al tipo de cobertura.....	50
Tabla 7 Resultados de la prueba de paralelismo de pendientes para las relaciones erosión (Er)- escorrentía (Es).	52

Lista de Figuras

	Pág
Figura 1 Mapa localización parcelas de muestreo para la evaluación de la erosión entre ecosistemas altoandinos	22
Figura 2 Precipitación incidente, precipitación artesanal e intensidades máximas y medias registradas durante 16 semanas de monitoreo.....	32
Figura 3 Distribución y variabilidad de la interceptación del dosel (mm) para las coberturas vegetales evaluadas	34
Figura 4 Variación semanal de la precipitación interna (P_i) por tipo de cobertura vegetal en comparación con la precipitación incidente (P).....	36
Figura 5 Variación mensual de la precipitación interna (P_i) por tipo de cobertura vegetal en comparación con la precipitación incidente (P).....	37
Figura 6 Dinámica semanal de la escorrentía superficial (A) y la erosión hídrica (B) en relación con la precipitación incidente para las coberturas vegetales evaluadas	40
Figura 7 Dinámica mensual de la escorrentía superficial (A) y la erosión hídrica (B) en relación con la precipitación incidente para las coberturas vegetales evaluadas	42
Figura 8 Análisis de Componentes Principales (PCA) para las variables hidrológicas y de erosión bajo diferentes coberturas vegetales.....	44
Figura 9 Análisis de erosión por tipo de cobertura (Tukey)	51

Lista de Apéndices

	Pág
Apéndice A Coberturas vegetales	66
Apéndice B Construcción de los materiales de campo: Pimpinas de almacenamiento de escorrentía superficial, láminas para la delimitación de las parcelas y pluviómetros artesanales.	67
Apéndice C Adecuación de las parcelas	69
Apéndice D Colocación de las estaciones meteorológicas.....	70
Apéndice E Toma de datos	71
Apéndice F Secado y pesado de las muestras de erosión para cada cobertura	72
Apéndice G Lista de participantes del taller prevención y control de la erosión.....	72
Apéndice H Primer taller de erosión con la comunidad.....	73

Resumen

Título: Respuesta de la erosión a la variabilidad de la precipitación y los usos del suelo en ecosistemas altoandinos*

Autor: Yohani Humberto Peña Jaimes, Nicolás López Barajas**

Palabras Clave: Erosión hídrica, escorrentía superficial, coberturas vegetales, servicios ecosistémicos.

Descripción: La degradación del suelo por erosión hídrica representa una de las principales amenazas para la estabilidad de los servicios ecosistémicos en áreas de alta montaña. Este estudio evaluó la relación entre las variables de precipitación (magnitud, intensidad máxima, intensidad media, frecuencia y número de días secos), los procesos de escorrentía superficial y erosión del suelo en cinco coberturas vegetales típicas de la provincia de García Rovira, Santander: bosque natural (roble), pastizal, plantación forestal (*Pinus patula*), cultivo de durazno (*Prunus persica*) y un sistema agroforestal (SAF) de café. Durante un periodo de monitoreo de 16 semanas (agosto-noviembre de 2025), se registraron datos pluviométricos mediante estaciones meteorológicas y se midieron semanalmente los flujos de escorrentía superficial y erosión en parcelas experimentales de 20 m². Los resultados evidenciaron que el pastizal presenta la mayor vulnerabilidad hidrológica con picos de escorrentía superficial superiores a 15 mm, mientras que el cultivo de durazno registró las mayores tasas de erosión, alcanzando un máximo de 5,5 kg/ha en la semana 12 debido a la baja cobertura vegetal y al impacto directo de las gotas de lluvia. El análisis de componentes principales (ACP) confirmó que la intensidad máxima de la lluvia es el principal disparador de la degradación en sistemas intervenidos. Estos hallazgos subrayan la importancia de conservar las coberturas boscosas naturales para mitigar los efectos del cambio climático y mejorar la gestión ambiental en paisajes altoandinos.

**

** ***Trabajo de Grado*** **

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED). Programa de Ingeniería Forestal. Director: Diego Suescún Carvajal, MSc. en Bosques y Conservación Ambiental.

Abstract

Title: Erosion response to precipitation variability and land use in High Andean ecosystems*

Author(s): Yohani Humberto Peña Jaimes, Nicolás López Barajas**

Key Words: Water erosion, surface runoff, vegetation cover, ecosystem services.

Description: Soil degradation caused by water erosion represents one of the primary threats to the stability of ecosystem services in high-mountain areas. This study evaluated the relationship between precipitation variables (magnitude, maximum intensity, average intensity, frequency, and number of dry days) and the processes of surface runoff and soil loss across five typical vegetation covers in the province of García Rovira, Santander: oak forest (natural forest), grassland, forest plantation (*Pinus patula*), peach crop (*Prunus persica*), and a coffee agroforestry system (AFS). During a 16-week monitoring period (August–November 2025), rainfall data were recorded using automatic weather stations, while surface runoff flows and erosion were measured weekly in 20 m² experimental plots. The results showed that grassland exhibits the highest hydrological vulnerability, with surface runoff peaks exceeding 15 mm. Meanwhile, the peach crop recorded the highest erosion rates, reaching a maximum of 5.5 kg/ha in week 12 due to low basal cover and the direct impact of raindrops. Principal Component Analysis (PCA) confirmed that maximum rainfall intensity is the main trigger for degradation in disturbed systems. These findings highlight the importance of conserving natural forest covers to mitigate the effects of climate change and improve environmental management in High Andean landscapes.

††

Degree Work *

Institute for Regional Outreach and Distance Education (IPRED). Forestry Engineering Program.
Director: Diego Suescún Carvajal, MSc. Forests and Environmental Conservation.

Introducción

La erosión (Er) del suelo se define como la remoción acelerada de la capa superior fértil por agentes físicos como el agua, el viento o la labranza. Este proceso, aunque intrínseco a la dinámica geomorfológica de la Tierra, se ha transformado en una crisis ambiental de magnitud global debido a la intensificación de la intervención humana (Goudie & Viles, 2017). Fenómenos como la deforestación a gran escala, la transición hacia una agricultura intensiva y la expansión de la frontera urbana han acelerado significativamente las tasas de Er, superando por órdenes de magnitud la capacidad natural de pedogénesis o formación de nuevos horizontes edáficos (Borrelli., 2020). En este contexto, la Er no debe entenderse simplemente como el desplazamiento de sedimentos, sino como la degradación sistemática del horizonte A. Esta capa superficial, que generalmente oscila entre los 20 y 30 cm de profundidad, constituye el epicentro de la actividad biológica y bioquímica que sostiene la vida terrestre. Su pérdida física representa un vacío ecológico de difícil recuperación, comprometiendo la biodiversidad edáfica y la seguridad alimentaria a largo plazo (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] & Intergovernmental Technical Panel on Soils [ITPS], 2019).

La complejidad de este fenómeno se ve potenciada por el actual escenario de cambio climático, el cual opera mediante la intensificación del ciclo hidrológico. El incremento de la temperatura media global eleva la capacidad de la atmósfera para retener humedad, derivando en un aumento de la frecuencia y magnitud de eventos de precipitación extrema (Douville et al., 2021). Estas lluvias torrenciales poseen una energía cinética superior al impactar el suelo; cuando esta energía supera la capacidad de infiltración de la matriz edáfica, se genera una escorrentía

superficial (E_s) agresiva que arrastra partículas del horizonte A con gran facilidad (Eekhout et al., 2018). Simultáneamente, el calentamiento global altera los patrones de cobertura vegetal y las propiedades físicas del sustrato. Las sequías prolongadas reducen la biomasa protectora y desecan la estructura del suelo, dejándolo vulnerable a la erosión y al impacto devastador de lluvias posteriores sobre suelos pulverizados. En regiones de alta montaña, este escenario se agrava con el derretimiento del permafrost, que desestabiliza terrenos antes anclados por el hielo (Hock et al., 2019).

En regiones tropicales, los ecosistemas altoandinos desempeñan un papel estratégico al proveer servicios de regulación hídrica y protección del suelo (Suescún et al., 2023). Estos biomas actúan como reguladores naturales que mitigan los procesos erosivos y garantizan la estabilidad del paisaje (Labrière et al., 2015). Sin embargo, la alta vulnerabilidad de estos ecosistemas frente al cambio ambiental global es evidente, especialmente debido a la conversión de bosques nativos en sistemas productivos de diversa índole, lo que altera drásticamente el balance hídrico y la arquitectura porosa del suelo (Balthazar et al., 2015; Suescún et al., 2023). La eliminación del dosel boscoso modifica procesos hidrológicos fundamentales como la interceptación foliar y la infiltración profunda, lo que deriva en un incremento exponencial de la escorrentía superficial y de las tasas de erosión hídrica (Wasige et al., 2013). Esta ruptura en la relación entre la precipitación (fuerza impulsora), la E_s (agente de transporte) y la E_r (resultado físico) compromete la resiliencia del ecosistema (Negishi et al., 2008; Leitinger et al., 2010).

Pese a la importancia de los bosques altoandinos, los impactos específicos de esta transformación sobre la dinámica física del suelo aún no se comprenden plenamente en muchas regiones del trópico húmedo. Existe una necesidad crítica de estudios que determinen el efecto

combinado de la modificación del paisaje y la intensidad de la lluvia sobre la generación de Es y Er. Por ello, este proyecto se enfoca en generar información a partir del monitoreo directo en campo, aportando datos experimentales que contribuyan a mejorar la planificación y gestión territorial, facilitando la toma de decisiones basada en el conocimiento científico de la interacción precipitación-escorrentía-erosión en contextos rurales. Esta transformación de las coberturas naturales se manifiesta principalmente en favor del establecimiento de sistemas productivos, cuya sostenibilidad ambiental debe ser evaluada con rigor desde la perspectiva de la regulación hidrológica y la magnitud de las tasas de erosión que generan.

Bajo esta premisa, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar de manera comparativa las tasas de erosión y la generación de escorrentía en diversos agroecosistemas predominantes en la región, tomando como ecosistema de referencia un bosque altoandino nativo con bajo grado de intervención. Se parte de la hipótesis de que la pérdida de la estructura boscosa y la alteración de la arquitectura porosa del suelo en los sistemas productivos derivan en un incremento exponencial de la Es, reduciendo significativamente la resiliencia hídrica del paisaje frente a eventos de precipitación extrema.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar las relaciones que se presenta entre las diferentes variables de la precipitación y la erosión, considerando dos escalas temporales (semanal y mensual) en cinco coberturas vegetales típicas de ecosistemas altoandinos: bosque natural, plantación forestal, cultivo, pastizal y sistema agroforestal.

1.2 Objetivos específicos

Determinar las tasas de escorrentía superficial (mm) y erosión (kg/ha) a escala semanal y mensual en cinco coberturas vegetales.

Relacionar las variables de la precipitación (magnitud e intensidad) con la escorrentía superficial y erosión en las cinco coberturas vegetales.

Capacitar a la comunidad rural en temas relacionados con buenas prácticas agrícolas para la conservación del suelo y sus servicios ecosistémicos.

2. Marco teórico

2.1 Ecosistema altoandino

El ecosistema altoandino corresponde a una franja altitudinal de los Andes tropicales ubicada aproximadamente entre los 2.400 y 3.500 m s. n. m., caracterizada por condiciones climáticas de bajas temperaturas, alta humedad relativa y elevada variabilidad térmica diaria (Cortés et al., 2020). Estos ecosistemas albergan una alta biodiversidad y cumplen funciones ecológicas fundamentales, como la regulación hídrica, la captura de carbono y la protección del suelo frente a procesos erosivos (León et al., 2014).

Desde el punto de vista estructural, los bosques altoandinos presentan una cobertura vegetal densa, con doseles cerrados y estratificación compleja, lo cual influye directamente en la disponibilidad de luz, la dinámica de regeneración y los procesos ecohidrológicos (Avella & Rangel, 2016). Son ecosistemas montañosos que protegen una amplia biodiversidad en Colombia, albergando a muchas especies y cumpliendo funciones importantes (León et al., 2014). Aunque se desarrollan en terrenos empinados, la presencia de una cobertura vegetal continua y un mantillo bien formado protege el suelo, amortiguando el impacto de la lluvia, reduciendo la escorrentía superficial y limitando la pérdida de nutrientes, lo que disminuye su vulnerabilidad a la erosión (Suescún et al., 2017). Sin embargo, estos ecosistemas han experimentado una transformación significativa debido a actividades antrópicas como la expansión agrícola, la ganadería y la deforestación, lo que ha reducido considerablemente su extensión y funcionalidad ecológica (Rangel, 2000; Velasco-Linares & Vargas, 2008)

2.2 Cambio climático

El cambio climático se define como una alteración significativa y persistente de los patrones climáticos globales o regionales, atribuida principalmente al incremento de gases de efecto invernadero derivados de actividades humanas (IPCC, 2021). En ecosistemas de montaña como el altoandino, sus efectos son particularmente sensibles debido a la estrecha relación entre temperatura, precipitación y procesos ecológicos.

Entre los principales impactos se destacan modificaciones en los regímenes de precipitación, aumento de la temperatura media, cambios en la evapotranspiración y alteraciones en la distribución de especies (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2018). Estas variaciones afectan directamente procesos como la infiltración, la escorrentía y la erosión del suelo, incrementando la vulnerabilidad de estos ecosistemas. Asimismo, el cambio climático puede modificar la dinámica del dosel forestal, influir en la formación de claros y alterar los procesos de regeneración natural, generando cambios en la estructura y funcionamiento del bosque (Cortés et al., 2020).

2.3 Precipitación

La precipitación corresponde a cualquier forma de agua que cae desde la atmósfera hacia la superficie terrestre, incluyendo lluvia, granizo o nieve, y constituye uno de los principales componentes del ciclo hidrológico (Chow et al., 1988). En ecosistemas forestales, la precipitación es un factor determinante en la dinámica del suelo, la disponibilidad hídrica y los procesos de erosión.

En el contexto de los bosques altoandinos, la precipitación se caracteriza por una alta variabilidad temporal y espacial, lo que incide en la generación de escorrentía superficial y en la redistribución del agua dentro del sistema (IDEAM, 2018). La intensidad y duración de los eventos de lluvia influyen directamente en la disgregación de partículas del suelo y en la movilización de sedimentos. Además, la precipitación interactúa con la cobertura vegetal, dando lugar a procesos como la interceptación y la precipitación interna, los cuales modulan la cantidad de agua que finalmente alcanza el suelo (Bruijnzeel, 2001).

2.4 Interceptación del dosel

La interceptación del dosel es el proceso mediante el cual una fracción de la precipitación es retenida temporalmente por las hojas, ramas y troncos de la vegetación antes de alcanzar el suelo (Calder, 1996). Este almacenamiento superficial puede posteriormente evaporarse o escurrirse hacia el suelo en forma de goteo.

Este proceso desempeña un papel clave en la regulación del ciclo hidrológico, ya que reduce la energía cinética de las gotas de lluvia, disminuyendo su capacidad de impacto sobre el suelo y, por tanto, su potencial erosivo (Schellekens et al., 1999). En bosques con doseles densos, como los altoandinos, la interceptación puede representar un porcentaje significativo de la precipitación total. La magnitud de la interceptación depende de factores como la estructura del dosel, el índice de área foliar (LAI), la intensidad de la lluvia y las condiciones climáticas (Crockford & Richardson, 2000).

2.5 Precipitación interna

La precipitación interna, corresponde a la fracción de la lluvia que atraviesa el dosel vegetal y llega al suelo, ya sea directamente o después de escurrirse por las superficies foliares (Herwitz, 1985). Este componente constituye la principal vía de entrada de agua al suelo en ecosistemas forestales. Su distribución es altamente heterogénea debido a la variabilidad estructural del dosel, lo que genera zonas con diferentes niveles de humedad en el suelo (Levia & Frost, 2006). En presencia de claros, la precipitación interna aumenta significativamente debido a la ausencia de cobertura vegetal. Este proceso es fundamental para la recarga hídrica del suelo, el transporte de nutrientes y la activación de procesos biogeoquímicos (Levia et al., 2019).

2.6 Escorrentía superficial

La escorrentía superficial se define como el flujo de agua que se desplaza sobre la superficie del suelo cuando la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración del terreno (Horton, 1933). Este proceso constituye un mecanismo clave en la redistribución del agua y sedimentos. En ecosistemas altoandinos, la escorrentía está fuertemente influenciada por la pendiente, la cobertura vegetal y las características físicas del suelo, incluyendo textura, estructura, porosidad y contenido de materia orgánica (Suescún et al., 2017).

Adicionalmente, la escorrentía superficial está estrechamente relacionada con los procesos de erosión hídrica, dado que el flujo de agua sobre la superficie facilita el desprendimiento y transporte de partículas del suelo, especialmente en áreas con pendientes pronunciadas y baja cobertura vegetal (Morgan, 2005). En este ámbito, el estudio de la escorrentía superficial en ecosistemas altoandinos resulta fundamental para comprender la dinámica hidrológica, evaluar la vulnerabilidad a procesos erosivos y diseñar estrategias de manejo y conservación del suelo,

especialmente en contextos donde existen presiones antrópicas y cambios en la cobertura vegetal (IDEAM, 2018).

2.7 Erosión

La erosión es el proceso de desprendimiento, transporte y deposición de partículas del suelo causado por agentes como el agua, el viento o la gravedad (Morgan, 2005). En ecosistemas montañosos, como los altoandinos, la erosión hídrica es el tipo predominante debido a la interacción entre altas pendientes, precipitaciones intensas y suelos con diferentes grados de susceptibilidad a la disgregación. La energía cinética de las gotas de lluvia provoca el desprendimiento inicial de partículas del suelo, proceso conocido como erosión por salpicadura, el cual constituye la fase inicial del proceso erosivo (Panagos et al., 2015).

La vegetación desempeña un papel fundamental en la protección del suelo, ya que reduce el impacto directo de la lluvia, mejora la estabilidad estructural mediante el sistema radicular y disminuye la velocidad de la escorrentía superficial (Gyssels et al., 2015). En contraste, la pérdida de cobertura vegetal debido a actividades antrópicas como la deforestación, la expansión agrícola o el sobrepastoreo incrementa significativamente la susceptibilidad del suelo a la erosión. Estas perturbaciones alteran la estructura del suelo, reducen su capacidad de infiltración y favorecen el transporte de sedimentos, intensificando los procesos de degradación (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] & Intergovernmental Technical Panel on Soils [ITPS], 2019).

3. Materiales y métodos

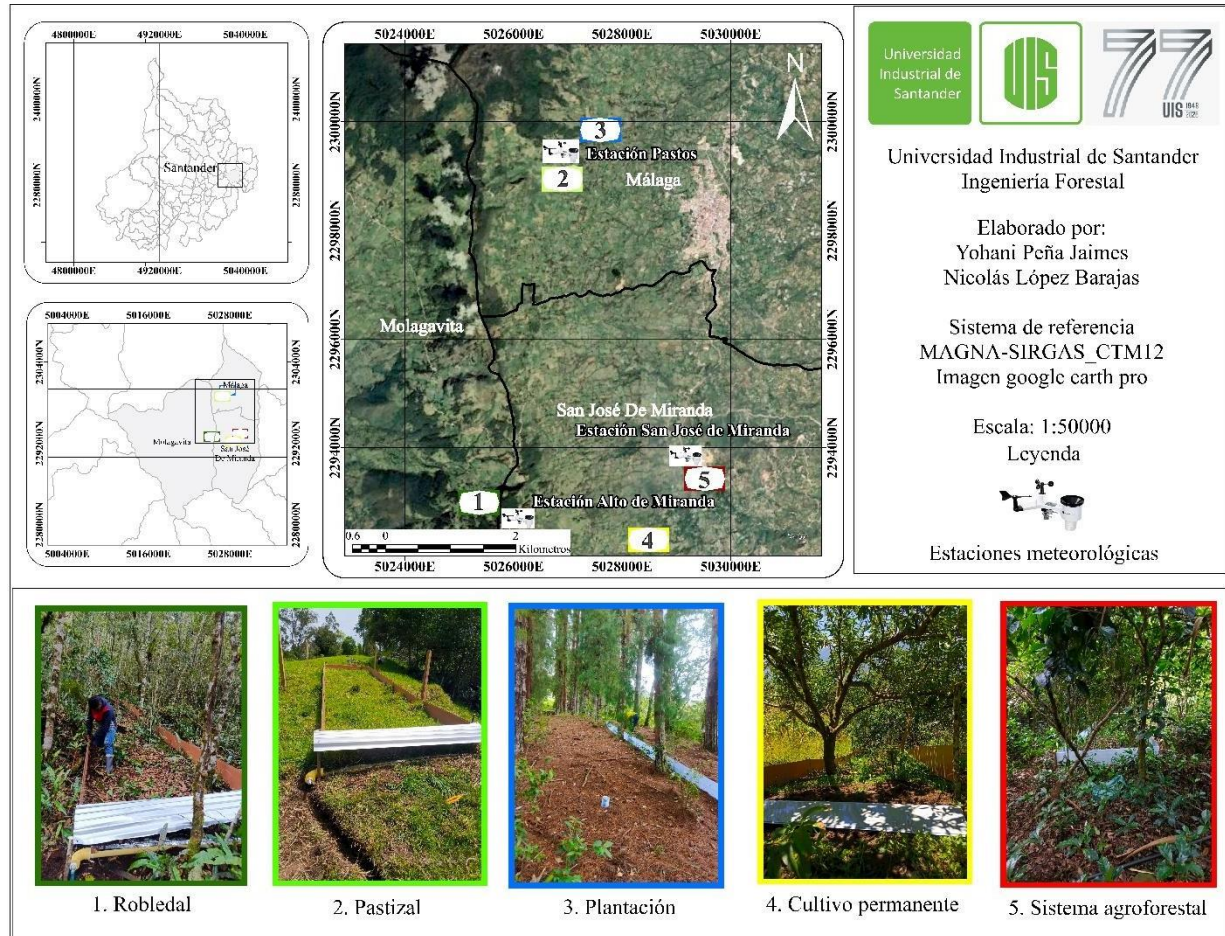
En este estudio, durante cuatro meses se monitorearon semanalmente diferentes procesos hidrológicos como precipitación (P), precipitación interna (Pi), interceptación del dosel (I), y Es; además de las tasas de Er. Los flujos hidrológicos en lámina (mm) y la Er en kg/ha. Para esto, se establecieron dos parcelas de erosión en cinco tipos de coberturas vegetales/ usos del suelo que representan diferentes estados de intervención antrópica (robleal, pastizal, plantación forestal, cultivo permanente y sistema agroforestal de café-SAF) en zonas altoandinas.

3.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en ecosistemas altoandinos ubicados en la provincia de García Rovira, Santander, Colombia. Específicamente en los municipios de Málaga, Molagavita y San José de Miranda en áreas con bosques naturales y plantados, cultivos, pastizales y SAF (Figura 1). Las áreas están comprendidas entre los 1900 y 3400 m s. n. m., en las zonas de vida de bosque húmedo premontano (bh-PM), bosque húmedo montano bajo (bh-MB) y bosque húmedo montano (bh-M), según la clasificación de zonas de vida para Colombia (Holdridge, 1987), con temperatura media anual de 10°C y precipitación media anual de 1584 mm. La zona de estudio presenta relieve ondulado a escarpado, con suelos arcillosos y arcillo-arenosos con alta acidez y generalmente del orden Inceptisol (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2005).

Figura 1

Localización de las parcelas de muestreo para la evaluación de la erosión en ecosistemas altoandinos



Nota. La localización fue elaborado utilizando el software ArcGIS Pro y Google Earth Pro, bajo el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS CTM12. Las fotografías inferiores muestran el montaje de las parcelas de erosión en las cinco coberturas evaluadas.

3.2 Coberturas vegetales/ usos del suelo

Se seleccionaron cinco coberturas vegetales (Apéndice A), que representan procesos de transformación de zonas altoandinas: bosque natural (robleal), plantación forestal con *Pinus patula*, cultivo permanente de durazno (*Prunus persica*), pastizal dedicado a la ganadería de leche y un SAF con café. El robleal representa un relicto de bosque natural dominado por *Quercus humboldtii* (Fagaceae), común en tierras altoandinas de Colombia y presente en las tres cordilleras, donde cubre un rango altitudinal entre los 1800 y 3450 m s. n. m. (Devia & Arenas, 2000), esta cobertura presenta una densidad de fustales de 223 individuos/ha y una abundante regeneración natural de 1124 latizales/ha (Jaimes & Rosales, 2019). El Diámetro a la altura del pecho (DAP) medio para los fustales es de 24,4 cm, con una altura media de 13,52 m y un área basal de 24,81 m²/ha. La plantación de *Pinus patula* fue establecida para la producción de madera; esta especie de pino es nativa de Centro América, y es conocida por su rápido crecimiento y su alta adaptabilidad a una variedad de condiciones edafoclimáticas. Debido a la inexistencia de registros dasométricos previos, se realizó un levantamiento de información primaria en campo mediante dos parcelas circulares de 500 m², la cobertura presenta una densidad de 650 individuos con un DAP promedio de 30,20 cm y una altura media de 10,72 m, evidenciando un desarrollo dasométrico uniforme (Apéndice k). El cultivo permanente se establece bajo un arreglo espacial de 7 x 7 m en tresbolillo, lo que representa una densidad de 233 plantas por hectárea, su manejo requiere de labranza para el control de malezas y la aplicación de fertilizante 10-30-10 (N-P-K), con una dosis de 400 kg/ha cada cuatro meses para su producción, así como de un manejo a partir de la aplicación de enmiendas agrícolas según los requerimientos específicos. El pastizal está dominado por *Cenchrus clandestinus*, una especie introducida desde el África Oriental y naturalizada en los

Andes colombianos (Castillo-Sierra et al., 2023). Esta cobertura está conformada por potreros establecidos dedicados a la ganadería de leche, allí se realizan diferentes prácticas de manejo como la rotación de potreros cada 30 días y fertilización después de la rotación con fertilizante 31-8-8-2 (N-P-K-Mg) con una dosis de 200 kg/ha cada mes. Finalmente, el SAF consiste en un arreglo de café (*Coffea arabica*) con una densidad de 3000 individuos/ha (1,5 m entre plantas y 2 m entre surcos), establecido bajo de sombra de individuos del género *Inga* (guamos), con una densidad de 39 individuos/ha. Según Cruz y Ramírez (2020), este componente arbóreo presenta un DAP entre 10 y 20 cm, y alturas totales que oscilan entre los 5 y 8 m.

3.3 Caracterización fisicoquímica de los suelos

En cada cobertura vegetal, se tomaron muestras del suelo superficial (horizonte A), para la determinación en laboratorio de las propiedades físico-químicas (textura, densidad aparente, MO, pH, Ca, Mg, K, P, N, entre otras). Se realizó siguiendo el protocolo técnico del laboratorio químico de suelos de la UIS. Inicialmente, se definieron recorridos en zigzag para cubrir cada área, asegurando la limpieza rigurosa de herramientas (pala, machete, pica y balde) para evitar contaminaciones. En cada punto de muestreo, se retiró la vegetación superficial y se excavó un hueco en forma de "V" a una profundidad de 20-30 cm. De la pared central del hueco se extrajo una faja de suelo de 3 cm de ancho, descartando los bordes laterales. Estas submuestras se recolectaron en un balde, donde se trituraron los terrones y se eliminaron elementos extraños (raíces y piedras) para su homogeneización manual. Finalmente, se obtuvieron muestras compuesta de 500 g, las cuales fueron empacadas en bolsas limpias y rotuladas con la información del sitio y el cultivo para enviarlas al laboratorio

El análisis comparativo de las propiedades fisicoquímicas del suelo para las cinco coberturas evidencia variaciones significativas asociadas al uso y manejo del suelo. Dos de estas coberturas presentan una textura Franco – Arenoso (roblechal y cultivo) y las otras tres presentan una textura Franco – Arcillo – Arenoso (plantación, pastizal y SAF). En términos de pH, todas las coberturas presentan condiciones ácidas, con valores que oscilan entre 4,0 und (roblechal) y 6,1 und (cultivo). El carbono (%) y la materia orgánica en promedio para las cinco coberturas es de 2,9. Siendo el más alto en el roblechal (4,75) y el más bajo en el SAF (1,99), respectivamente. En cuanto a los macronutrientes, el fósforo disponible en promedio para las cinco coberturas es de 21,2 ppm, siendo significativamente alto en pastizal (50,4 ppm) y más bajo en roblechal (3,8 ppm). El calcio y el magnesio son más elevados en sistemas intervenidos, especialmente en el cultivo. Asimismo, el potasio presenta valores moderados, en promedio 0,4 meq/100 g para las cinco coberturas.

Tabla 1

Propiedades físicas y químicas de los suelos para las cinco coberturas vegetales evaluadas

Cobertura	Textura	pH	C (%)	MO (%)	P (ppm)	Ca (meq/100g)	Mg (meq/100g)	K (meq/100g)	Al (meq/100g)
Roblechal	Franco-Arenoso	4,0	4,7	8,1	3,8	0,7	0,3	0,2	10,00
Pastizal	Franco-Arcillo-Arenoso	5,4	2,5	4,3	14,6	5,9	1,2	0,5	0,40
Plantación	Franco-Arcillo-Arenoso	4,9	2,7	4,7	50,4	3,6	0,2	0,2	4,60
Cultivo	Franco-Arenoso	6,1	2,7	4,6	32,42	8,5	1,5	0,9	N.A
SAF	Franco-Arcillo-Arenoso	5,2	1,9	3,4	4,6	6,5	0,9	0,1	N.D

Nota. C (%): Carbono orgánico; MO (%): Materia orgánica; P (ppm): Fósforo disponible; Ca, Mg, K y Al: Cationes intercambiables expresados en miliequivalentes por 100 g de suelo (meq/100g). N.A: No Aplica; se reporta para suelos con pH > 5,5 donde el aluminio intercambiable se precipita. N.D: No Detectado; indica que la concentración del elemento se encuentra por debajo del límite de detección del método analítico.

3.4 Diseño experimental

La caracterización de la precipitación como flujo de referencia y el registro de variables meteorológicas (magnitud, intensidad máxima, intensidad media, frecuencia y número de días secos) se llevó a cabo mediante el uso de tres estaciones meteorológicas automáticas (WiFi Ambient Weather WS-2902) (Apéndice D). Estas estaciones fueron instaladas siguiendo un gradiente altitudinal que permitió capturar la variabilidad climática de las cinco coberturas en estudio: estación 1, situada estratégicamente para el monitoreo de las áreas bajo cultivo y SAF, estación 2, ubicada cerca de la cobertura de robledal y estación 3, localizada en un punto intermedio entre las coberturas de pastizal y plantación. También se instalaron en campo abierto cuatro pluviómetros artesanales construidos con tubería de PVC, malla de polipropileno, embudo, manguera y tarro de recolección de agua.

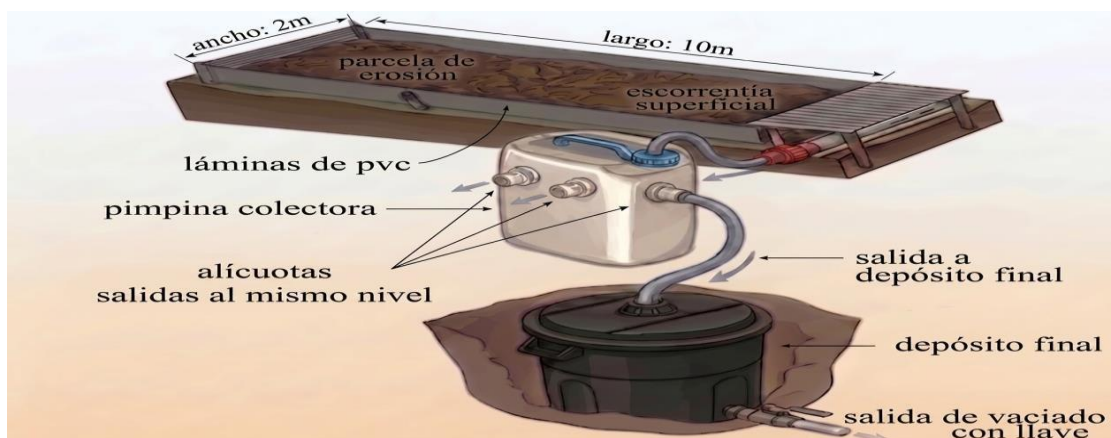
Para la medición de la precipitación interna en las cuatro coberturas forestales (robledal, plantación, cultivo y SAF), se instalaron seis pluviómetros en cada cobertura, distribuidos de forma aleatoria bajo el dosel mediante un transecto tres pluviómetros por sitio (Apéndice B). Con el fin de garantizar la calidad de las muestras y evitar la obstrucción de los sistemas de recolección, se instalaron filtros de tela muselina en cada dispositivo, impidiendo así el ingreso de material vegetal (hojas y ramas) o insectos a las mangueras y recipientes (García-Leoz et al., 2018).

En cada una de las coberturas vegetales, se escogieron dos sitios para el monitoreo de la Es y Er bajo condiciones similares de pendiente (18-22% en promedio). En cada sitio se instaló una parcela de erosión de 10 x 2 m (20 m² por parcela), orientada en el sentido de la pendiente y delimitada perimetralmente con láminas de PVC para evitar el ingreso de flujo externo y la salida del flujo de Es generado dentro de la parcela. En la parte inferior de cada una de las 10 parcelas, se instaló una canaleta de 3" de diámetro encargada de conducir el agua hacia el sistema de recolección o tanque de almacenamiento (Apéndice C).

El volumen de Es se recolectó mediante un sistema de tubería plástica a pimpinas colectoras calibradas que funcionaron como divisores de flujo (Figura 2). Estas contaban con cinco alícuotas (salidas) situadas al mismo nivel; una de estas alícuotas derivaba el flujo hacia una caneca de mayor capacidad (depósito final). Este diseño permitió, mediante un procedimiento de cálculo volumétrico basado en la relación de división, determinar la escorrentía total generada en cada parcela durante los eventos de precipitación.

Figura 2

Esquema detallado del sistema de recolección de escorrentía superficial y medición de erosión hídrica en parcelas de 20 m²



Nota. La pimpina colectora actúa como divisor de flujo, derivando 1/5 del volumen excedente hacia el depósito final a través de alícuotas calibradas al mismo nivel.

Para la captura de sedimentos, se implementó un sistema de filtrado sobre las canaletas utilizando una malla fina (velo suizo). Este velo, caracterizado por su permeabilidad y ligereza, permitió retener las fracciones de suelo arrastradas por el flujo superficial, facilitando al mismo tiempo el paso del agua hacia el sistema de almacenamiento.

3.5 Monitoreo en campo

El monitoreo de los flujos hidrológicos de cada uno de los sitios experimentales se llevó a cabo durante los meses de agosto a noviembre del 2025. Semanalmente, se realizaron recorridos sistemáticos por cada uno de los sitios experimentales para la recolección de datos de P, Pi, Es y Er (Apéndice E). La caracterización climática detallada se obtuvo mediante la descarga semanal de bases de datos en formato Excel, gestionadas a través de la aplicación *Ambient Weather*, la cual recolectaba la información de las estaciones meteorológicas automáticas instaladas en los sitios de estudio.

La medición de los volúmenes de agua en ml colectados en los pluviómetros y en los recipientes de almacenamiento de Es se realizó en campo mediante el uso de probetas plásticas graduadas. Para la medición de la Er, se recolectaron de forma individual los sedimentos retenidos en los filtros de tela muselina instalados en cada parcela; estas muestras fueron almacenadas en bolsas plásticas debidamente rotuladas para su posterior procesamiento.

3.6 Análisis de laboratorio

Cada semana, las muestras de sedimentos procedentes de cada parcela de erosión, por cobertura, se secaron en horno a 65°C por 48 horas; luego se tamizaron y pesaron (Apéndice F).

La caracterización físico-química de estos materiales se realizó en el laboratorio químico de suelos de la Universidad Industrial de Santander.

3.7 Procesamiento de datos

Con el objetivo de realizar el análisis de las relaciones P, Pi, I, Es y Er en las escalas de tiempo semanal y mensual, se determinaron las láminas de precipitación (mm) correspondientes a dichos periodos. A partir de los registros obtenidos cada cinco minutos por la estación meteorológica, se calcularon semanal y mensualmente diversas características de la precipitación, tales como la magnitud (mm), la intensidad máxima (mm/h) y la intensidad media (mm/h), frecuencia (número de eventos de lluvia) y número de días secos. La frecuencia se determinó siguiendo la metodología propuesta por Restrepo-Posada y Eagleson (1982). El número de días secos, definidos como la cantidad de días sin lluvia previos a la jornada de monitoreo; se calculó considerando como días secos aquellos cuya lámina de precipitación fue inferior al valor medio diario registrado (este promedio se obtuvo mediante la sumatoria del volumen total precipitado dividido por el número total de días evaluados). Por otro lado, se estimó la interceptación del dosel (I) como la diferencia entre la precipitación interna y la precipitación.

Finalmente, como indicador del potencial erosivo de las precipitaciones y para disponer de un estimador del riesgo de erosión, se calculó el Índice de Fournier Modificado (IFM). Si bien este índice se emplea convencionalmente para ciclos anuales, en este estudio se aplicó de manera parcial para caracterizar la agresividad climática específica del periodo de monitoreo, siguiendo el criterio adaptado de Cortés y Velasco (2009). La fórmula empleada para dicho cálculo fue:

$$IFM = \sum_{i=1}^n \frac{P_2^i}{P_t}$$

Donde:

Pi: Precipitación del mes i (mm).

Pt: Precipitación total del periodo de estudio (mm).

Con la finalidad de analizar las relaciones entre la P, Pi, Es y Er en diferentes escalas de tiempo, se determinaron los flujos de escorrentía (mm) y las tasas de erosión (kg/ha) para las 16 semanas de monitoreo (equivalentes a cuatro meses de medición) en cada parcela de erosión por cobertura vegetal. Posteriormente, los datos semanales de erosión se agruparon por mes para el análisis a escala mensual. Para determinar la relación entre la Es y Er con las características de la P (magnitud, intensidad máxima y media, número de eventos de lluvia y número de días secos), I y Pi, se realizó inicialmente un análisis de componentes principales (ACP) y luego un análisis exploratorio mediante correlaciones. La significancia estadística de los coeficientes de correlación de Pearson se determinó mediante una prueba t de Student con 14 grados de libertad (n-2), utilizando un nivel de confianza del 95%. Posteriormente, se ajustaron modelos de regresión lineal simple para cada una de las coberturas, empleando la siguiente ecuación general:

$$y = a + bx$$

Donde:

y: Variable dependiente (Es o Er).

x: Variable independiente (características de la P y flujos Pi).

b: Pendiente de la recta, que representa la tasa de cambio o respuesta de la cobertura.

Con el objetivo de comparar los valores de las pendientes de los modelos que resultaron significativos, se empleó la prueba de paralelismo de pendientes. Este procedimiento permitió

establecer la existencia o ausencia de diferencias estadísticas entre las coberturas en términos de su capacidad de regulación frente a las relaciones precipitación-escorrentía-erosión.

Finalmente, para determinar diferencias estadísticas significativas de E_s y E_r entre las distintas coberturas vegetales, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), seguido de pruebas de comparación de medias cuando fue necesario (Apéndice I).

4. Resultados y discusión

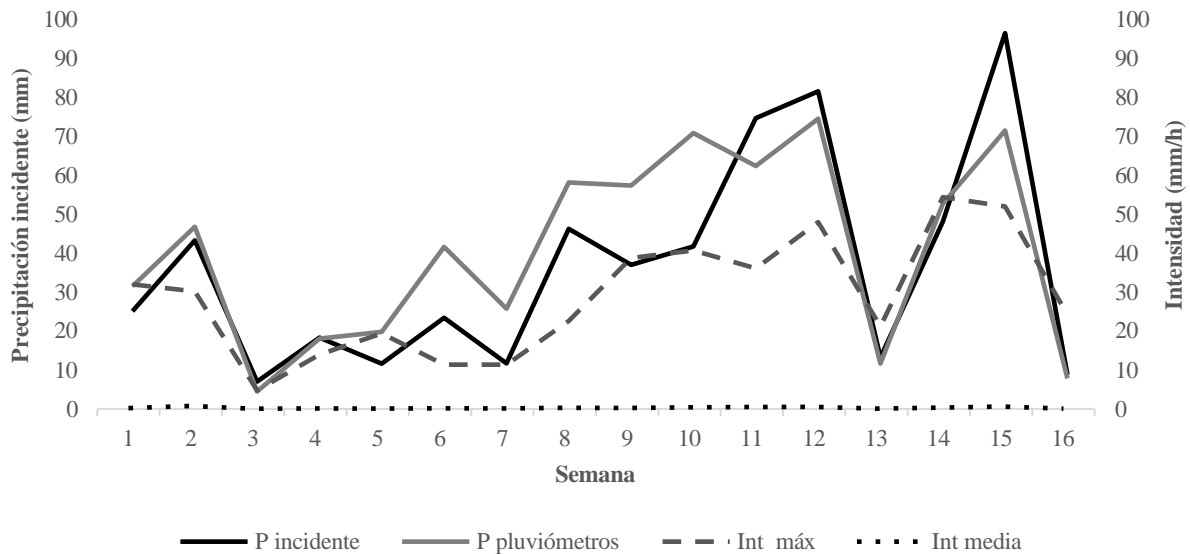
4.1 Caracterización de la precipitación

Durante las 16 semanas de monitoreo, la P registró variaciones según la ubicación de los instrumentos. Las estaciones meteorológicas instaladas (P incidente) reportaron un acumulado promedio (cuatro meses) de 595 mm, con una media mensual de 153,7 mm. Por su parte, los pluviómetros artesanales (P pluviómetros), ubicados en áreas abiertas cerca de las coberturas, capturaron un total acumulado de 651,6 mm, con un promedio mensual de 165,4 mm. Ambos sistemas de medición coincidieron en la distribución temporal de las lluvias: agosto se identificó como el mes más seco (76,8 mm en P estaciones y 84 mm en P pluviómetros), mientras que octubre fue el mes de mayor pluviosidad (265,6 mm y 287,8 mm, respectivamente).

El valor máximo de P alcanzó los 96,8 mm durante la semana 15 (noviembre), mientras que el mínimo fue de 7,5 mm en la tercera semana de agosto. Por su parte, las mediciones locales con pluviómetros artesanales mostraron una dinámica similar, pero con valores específicos: el valor máximo semanal se registró en la semana 12 (noviembre), en cuanto a los valores mínimos, los P pluviómetros reportaron 4,9 mm en la tercera semana de agosto, coincidiendo temporalmente con el registro mínimo de las P estaciones.

Figura 3

Precipitaciones, intensidades máximas y medias registradas durante 16 semanas de monitoreo



Nota. El eje vertical izquierdo representa la lámina de agua acumulada (mm), mientras que el eje vertical derecho indica la intensidad de la lluvia (mm/h). P incidente: Precipitación medida con estación automática; P pluviómetros: Precipitación medida con pluviómetro artesanal; Int máx: Intensidad máxima; Int media: Intensidad media.

La intensidad máxima varió entre 54,8 y 5,2 mm/h y la intensidad media entre 0,75 y 0,04 mm/h. El número de eventos de lluvia varió según el gradiente altitudinal de las cinco coberturas: la estación uno, situada estratégicamente para el monitoreo de las áreas bajo cultivo y SAF registró eventos de lluvia de dos a siete eventos semanales, la estación 2, ubicada cerca de la cobertura de robleal registró eventos semanales de 2 y 10 y, la estación 3, localizada en un punto intermedio entre las coberturas de pastizal y plantación registró de 3 a 10 eventos de lluvia semanal. Se definió un "día seco" como aquel cuya lámina de precipitación fue inferior al valor medio diario registrado de 5,5 mm, las semanas 2, 3, 7 y 13 presentaron el mayor número de días secos, registrando un total de siete días secos previos a cada jornada de monitoreo.

4.2 Intercepción del dosel

La I presentó variaciones significativas entre los sistemas evaluados (Figura 4). El valor registrado en el SAF con un 11,1% y la plantación forestal con un 10,2% fueron los más altos del estudio. Estos hallazgos son consistentes con lo expuesto por Gómez-Gómez et al., (2014), quienes determinaron que en sistemas con estructuras arbóreas densas o estratificadas, una fracción considerable de la precipitación incidente es retenida por el follaje y evaporada antes de alcanzar la superficie del suelo. La complejidad arquitectónica del SAF, al combinar diferentes estratos vegetales, optimiza esta capacidad de captura hídrica (Díaz-Perea et al., 2020).

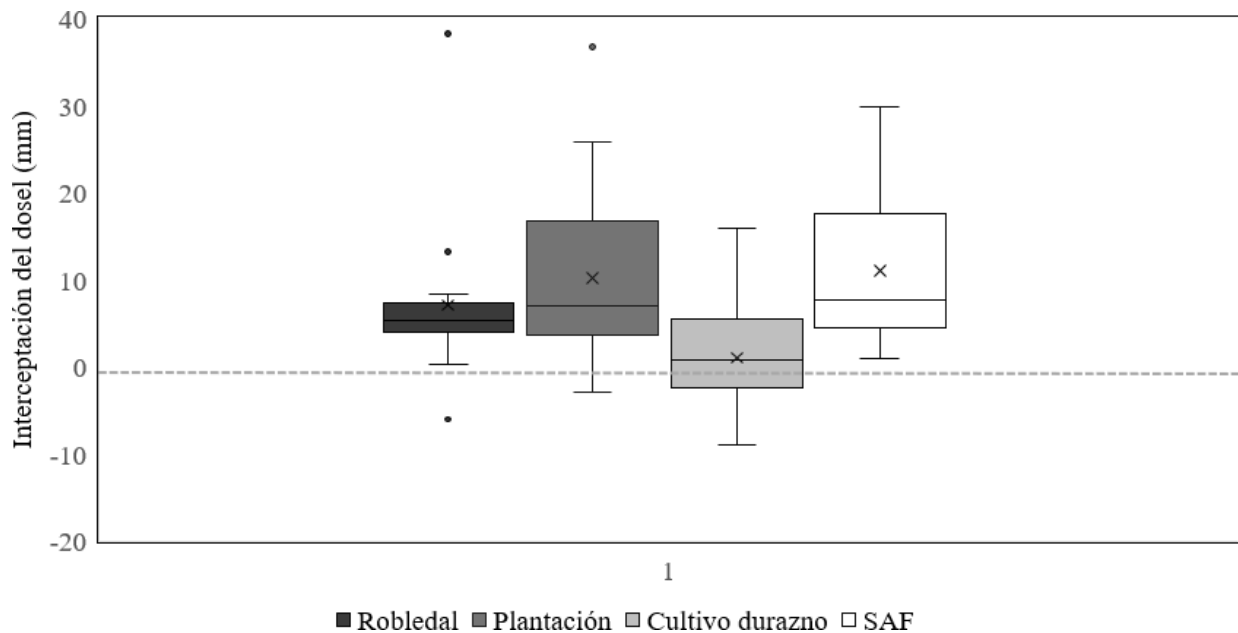
Por su parte, el robledal registró una I del 8,2%. Si bien la literatura clásica suele asignar valores superiores a los bosques nativos de *Quercus humboldtii* debido a su biomasa de epífitas, el menor valor hallado en este estudio frente a la plantación y el SAF se atribuye a factores estructurales específicos de los ecosistemas estudiados. Según Zimmermann et al. (2015) y Hormot et al. (2022), la interceptación es altamente dependiente de la densidad de copas y la intensidad de los eventos de lluvia; en este sentido, una estructura de robledal más abierta o intervenida, sumada a lluvias de alta intensidad que saturan rápidamente el dosel, puede derivar en una menor interceptación comparada con plantaciones forestales de dosel cerrado y homogéneo.

En contraste, la capacidad de regulación hídrica se vio drásticamente reducida en el cultivo, alcanzando apenas un 1,0%. Este resultado coincide con lo reportado por Muñoz-Villers et al. (2023) sobre la vulnerabilidad de los suelos ante la eliminación de coberturas densas en zonas de alta pendiente. La simplificación extrema del dosel en sistemas frutales no solo reduce la

intercepción al mínimo, sino que altera la energía con la que la precipitación interna impacta directamente el suelo, acelerando los procesos de erosión hídrica.

Figura 4

Distribución y variabilidad de la intercepción del dosel (mm) para las coberturas vegetales evaluadas



Nota. La línea horizontal dentro de la caja representa la mediana, mientras que la x indica la media aritmética. Los bigotes se extienden hasta los valores mínimos y máximos, y los puntos externos representan valores atípicos (*outliers*).

Como indicador del potencial erosivo de las precipitaciones, el cálculo del índice de Fournier modificado (IFM), para el periodo de monitoreo evidenció variaciones en la agresividad climática entre los puntos de medición: la estación 3 registró el valor más alto con 266,0, seguida por la estación 1 (203,6), ambas clasificadas con una agresividad muy alta. Por su parte, la estación 2 presentó un valor de 122,01, lo que representa una agresividad climática alta. Estos valores

coinciden con lo expuesto por Chisadza et al. (2024), quienes señalan que, en regiones subhúmedas, la agresividad climática se concentra en eventos episódicos de alta energía, como el pico registrado en la semana 15 con 96,8 mm.

4.3 Precipitación interna

4.3.1 Escala semanal

Durante las 16 semanas de monitoreo, se identificó una alta variabilidad temporal en la P_i , con rangos que oscilaron entre los 7,5 mm (semana 3) y picos superiores a los 90 mm (semanas 12 y 15). Un hallazgo relevante ocurrió en las semanas 12 y 14, donde el robledal y el cultivo registraron valores de P_i que superaron el promedio de la lluvia incidente general. Este fenómeno, conocido como "goteo de dosel concentrado" (*drip flow*), ocurre cuando la estructura foliar canaliza el agua hacia puntos específicos, superando la lámina de agua caída a cielo abierto.

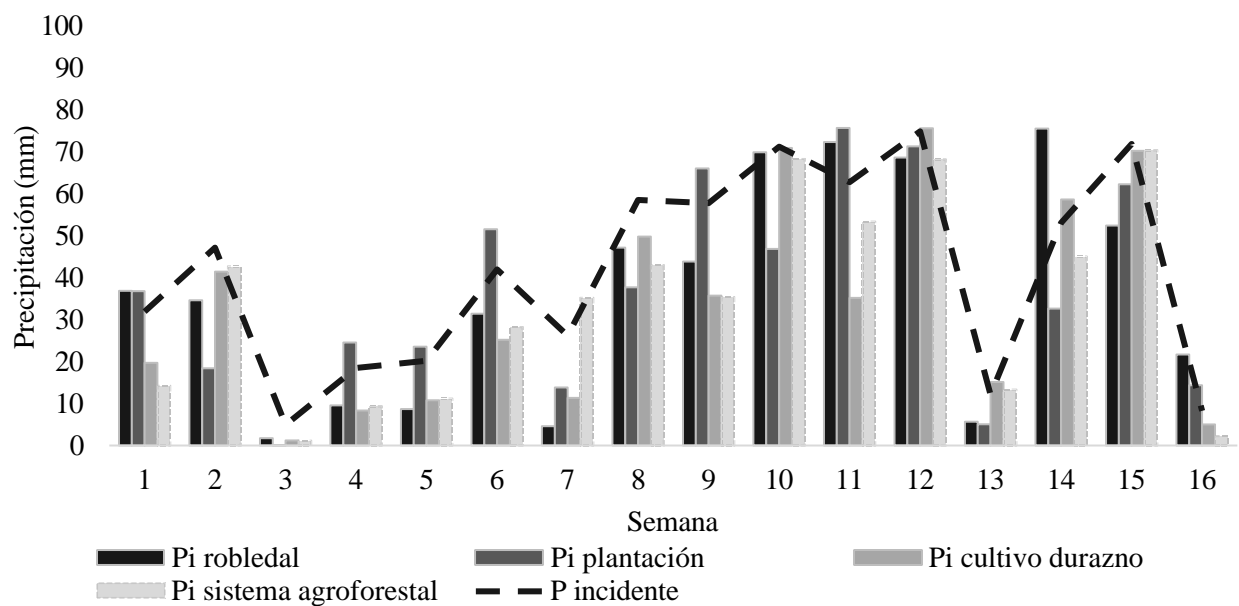
En los eventos de mayor magnitud (semanas 12 y 15), las coberturas con mayor densidad de dosel, como el robledal y la plantación, demostraron una mayor capacidad de interceptación y regulación hídrica. Por el contrario, las coberturas con estructuras foliares menos densas o caducifolias, como el cultivo de durazno y el SAF, presentaron los mayores valores de P_i , permitiendo el paso casi directo del agua hacia la superficie del suelo. Según Rivera et al. (2010), la arquitectura del dosel es el principal factor regulador de la energía cinética de la lluvia, actuando como una barrera física que reduce el impacto directo sobre el suelo.

Asimismo, en eventos de baja intensidad como el de la semana 13 ($P < 15$ mm), se evidenció que las coberturas con estructura foliar compleja reflejan una P_i mínima. Esto se explica a través del concepto de capacidad de almacenamiento del dosel, donde el follaje retiene la totalidad o gran parte de la lluvia menuda, la cual posteriormente se evapora sin llegar al suelo;

como señalan Chisadza et al. (2024), esta función de la interceptación es vital en ecosistemas altoandinos para prevenir la saturación temprana de los poros del suelo y mitigar los procesos de Es inicial.

Figura 5

Variación semanal de la precipitación interna (Pi) por tipo de cobertura vegetal en comparación con la precipitación incidente (P)



Nota. La línea discontinua representa la precipitación incidente promedio (P) medida a cielo abierto. Las barras agrupadas indican la precipitación interna (Pi) que logra atravesar el dosel en cada cobertura.

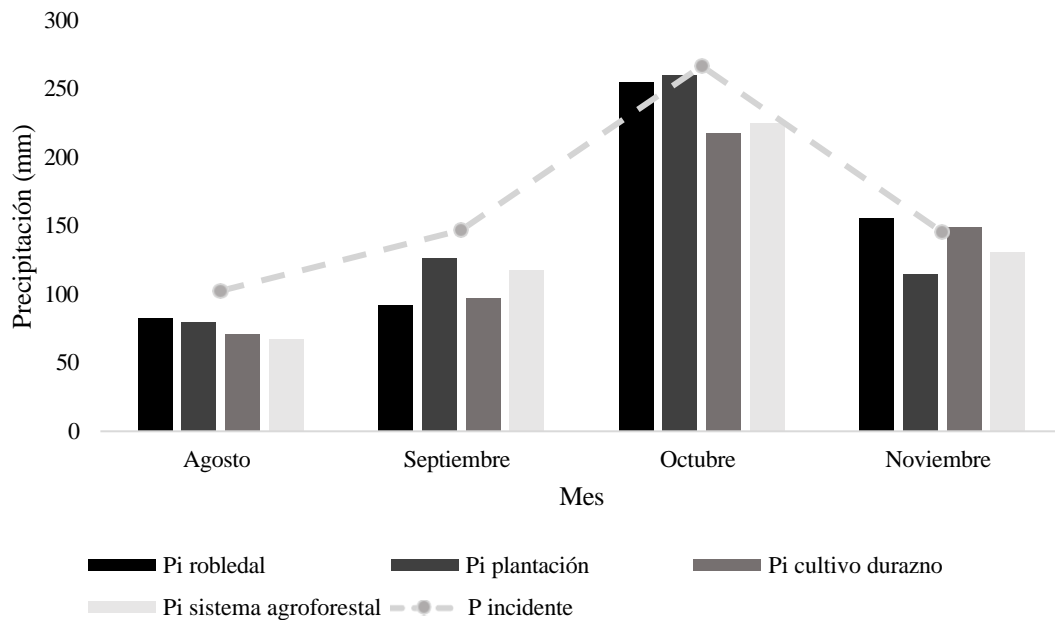
4.3.2 Precipitación interna en escala mensual

En esta escala de tiempo, se observa que la Pi sigue la misma tendencia que la P, con un incremento progresivo desde agosto hasta alcanzar su magnitud máxima en octubre,

decreciendo en el mes de noviembre. En los cuatro meses de estudio, la P_i es inferior al promedio de P incidente, lo que confirma el efecto de interceptación del dosel.

Figura 6

Variación mensual de la precipitación interna (P_i) por tipo de cobertura vegetal en comparación con la precipitación incidente (P)



Nota. La línea discontinua representa la precipitación incidente promedio (P) medida a cielo abierto. Las barras agrupadas indican la precipitación interna (P_i) que logra atravesar el dosel en cada cobertura.

4.4 Relaciones precipitación, escorrentía y erosión

En la Tabla 2 se presentan los datos crudos obtenidos durante las 16 semanas de monitoreo experimental. Se observa una variabilidad marcada entre las coberturas, donde el cultivo y el pastizal presentan los mayores acumulados totales tanto en E_r (13,86 kg/ha y 11,04 kg/ha

respectivamente) como en Es 79,35 mm, en comparación con coberturas más estables como la plantación, el robledal y el SAF.

Tabla 2

Valores semanales de erosión hídrica (Er) y escorrentía superficial (Es)

Semana	Er (kg/ha)					Es (mm)				
	Robledal	Pastizal	Plantación	Cultivo	SAF	Robledal	Pastizal	Plantación	Cultivo	SAF
1	0,53	1,05	0,33	2,43	1,08	0,12	3,70	0,07	0,24	0,01
2	0,08	0,05	0,08	0,48	0,15	0,11	2,77	0,00	0,33	0,00
3	0,13	0,15	0,01	0,10	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,03	0,20	0,15	0,30	0,05	0,05	0,45	0,08	0,03	0,00
5	0,06	0,10	0,11	0,20	0,06	0,01	0,37	0,00	0,04	0,00
6	0,13	0,15	0,11	0,11	0,11	0,06	14,62	0,04	0,07	0,00
7	0,10	0,30	0,11	0,35	0,21	0,00	0,20	0,00	0,05	0,00
8	0,15	1,85	0,06	0,26	0,10	0,05	18,86	0,01	0,18	0,01
9	0,30	1,45	0,20	0,70	0,15	0,06	7,22	0,02	0,27	0,00
10	0,40	0,45	0,11	0,75	0,25	0,27	5,87	0,07	0,80	0,01
11	0,30	1,25	0,30	1,15	0,35	0,85	14,45	0,09	0,11	0,01
12	0,15	0,82	0,10	5,54	0,19	0,13	0,25	0,01	0,96	0,00
13	0,06	0,09	0,10	0,18	0,03	0,02	0,07	0,00	0,11	0,01
14	0,07	0,11	0,10	0,37	0,01	2,54	0,50	0,00	0,44	0,00
15	0,18	2,36	0,58	0,45	0,04	0,19	9,88	0,00	0,73	0,00
16	0,45	0,67	0,06	0,53	0,09	0,03	0,15	0,00	0,02	0,01
Total	3,08	11,04	2,46	13,86	2,87	4,47	79,35	0,39	4,35	0,06
\bar{x}	0,19	0,69	0,15	0,87	0,18	0,28	4,96	0,02	0,27	0,00
σ	0,15	0,71	0,14	1,37	0,26	0,64	6,28	0,03	0,31	0,00

4.4.1 Escala semanal

La dinámica semanal de los flujos hídricos y de las tasas de erosión evidenció que la cobertura vegetal es el factor determinante en la regulación ecosistémica frente a la agresividad climática. En la Figura 7A, se observa que el pastizal presenta la mayor vulnerabilidad hidrológica, esta cobertura registró una escorrentía acumulada de 79,35 mm, un valor 17,7 veces superior al

del robledal, registrando picos de Es de 18,86 mm (Semana 8) y 14,62 mm (Semana 6). En términos de eficiencia, el coeficiente de Es del pastizal fue del 13% respecto a la precipitación total acumulada (595 mm), lo que representa una pérdida de regulación hídrica crítica en comparación con 0,74% (robledal) y 0,01% (SAF). Este comportamiento responde a una ineficiencia en los procesos de infiltración, derivada de la compactación del suelo por pisoteo bovino. De acuerdo con Hernández-Saldaña et al. (2025), los suelos de uso ganadero en Málaga, Santander, presentan una reducción drástica de la macroporosidad, lo que favorece el flujo superficial rápido. Asimismo, Suescún et al. (2017) señalan que en los Andes colombianos, la conversión de bosques a pastizales altera la partición del balance hídrico, transformando el suelo en una superficie casi impermeable ante eventos de lluvia intensa.

En contraste, el SAF, robledal y la plantación demostraron una alta capacidad de regulación hídrica. Sus niveles de escorrentía se mantuvieron cercanos a cero durante las 16 semanas, lo cual se explica por la interceptación foliar y el efecto protector de la hojarasca. Según León-Peláez et al. (2023), la estructura compleja de los bosques nativos norandinos optimiza la regulación por unidad de ocupación, donde el aporte de materia orgánica mejora la estabilidad de los agregados y favorece la infiltración profunda, mitigando el impacto de la precipitación incidente.

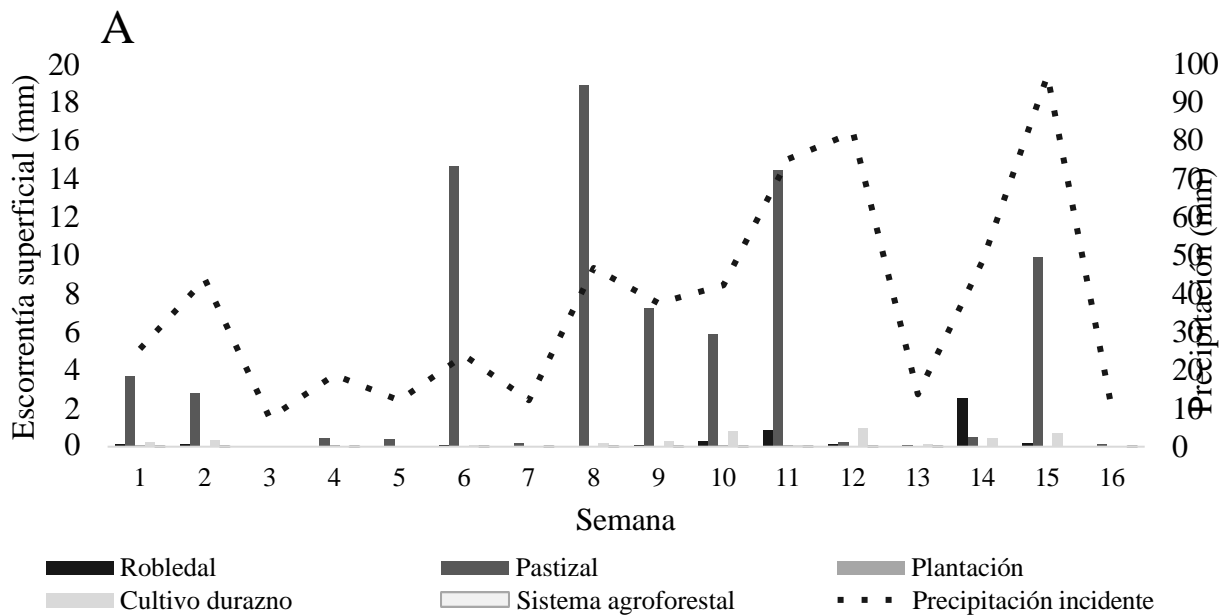
Por otro lado, la Figura 7A revela que la estabilidad edáfica está directamente ligada a la densidad del dosel, el robledal, al poseer una estructura forestal densa, amortigua la energía cinética de las gotas de lluvia, evitando la desagregación del suelo. Esta "estabilidad de referencia" contrasta con el cultivo de durazno y el pastizal, que presentaron los niveles más críticos de pérdida física de suelo. El cultivo alcanzó el máximo registrado de erosión con 5,5 kg/ha en la semana 12;

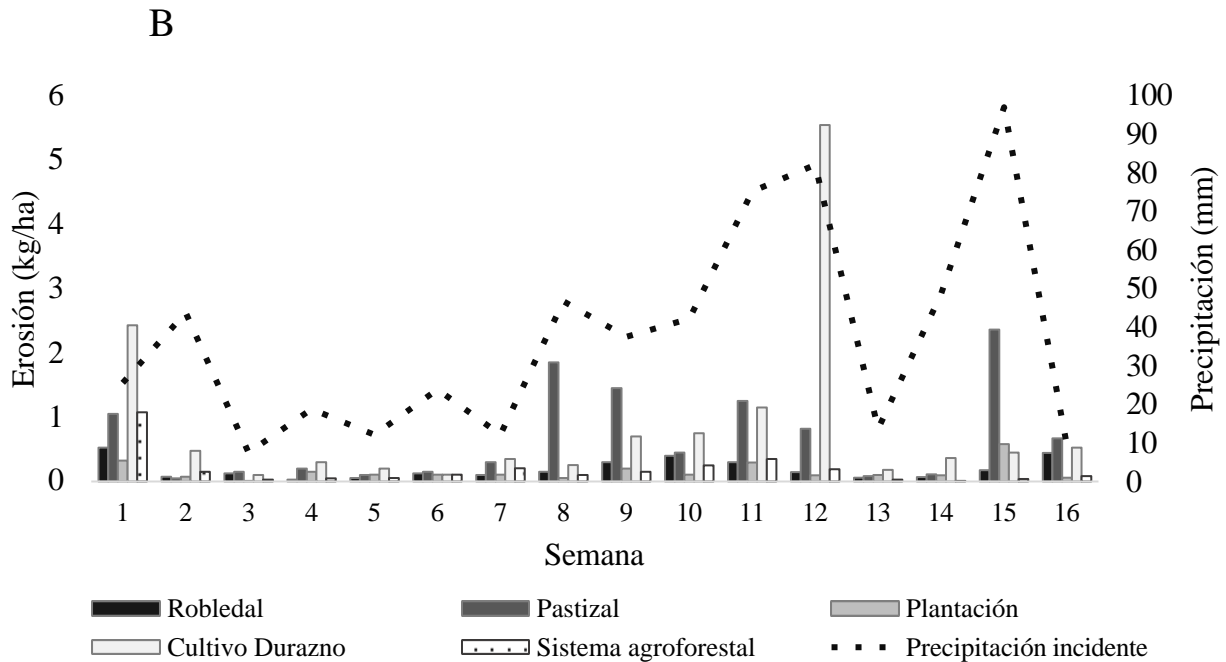
este fenómeno se debe a la escasa cobertura basal, la configuración del cultivo y sus prácticas de manejo, que deja el suelo con menor grado de protección al impacto directo de la lluvia.

Como indican Suescún et al. (2023), en paisajes transformados de alta montaña, la falta de protección mecánica del dosel en sistemas agrícolas facilita el desprendimiento y arrastre de sedimentos. Mientras que el robledal, el SAF y la plantación se consolidan como las coberturas más estables, manteniendo la integridad del perfil edáfico, las coberturas sujetas a actividades antrópicas (monocultivos y pastizales) muestran una respuesta drástica y proporcional a la magnitud de la precipitación, comprometiendo la sostenibilidad del recurso suelo a largo plazo.

Figura 7

Dinámica semanal de la escorrentía superficial (A) y la erosión hídrica (B) en relación con la precipitación incidente para las coberturas vegetales evaluadas





Nota. El panel A muestra la escorrentía superficial acumulada (mm) y el panel B la pérdida de suelo o erosión (kg/ha). En ambas figuras, la línea punteada representa la precipitación incidente (mm) en el eje vertical derecho. Se observa que el Pastizal presenta los mayores picos de escorrentía (semanas 8 y 11), mientras que el Cultivo de Durazno registra la mayor tasa de erosión en la semana 12.

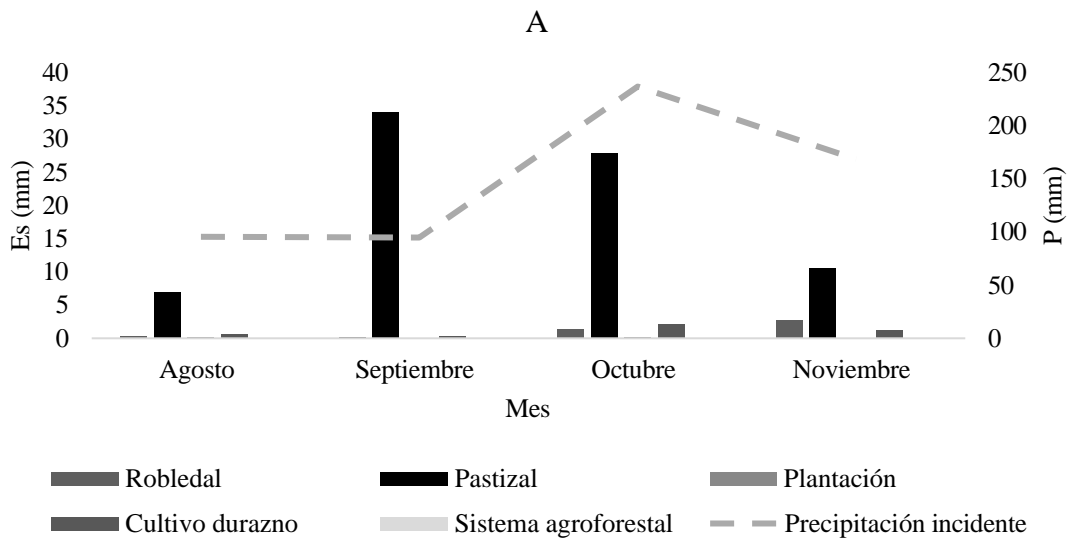
4.4.2 Escala mensual

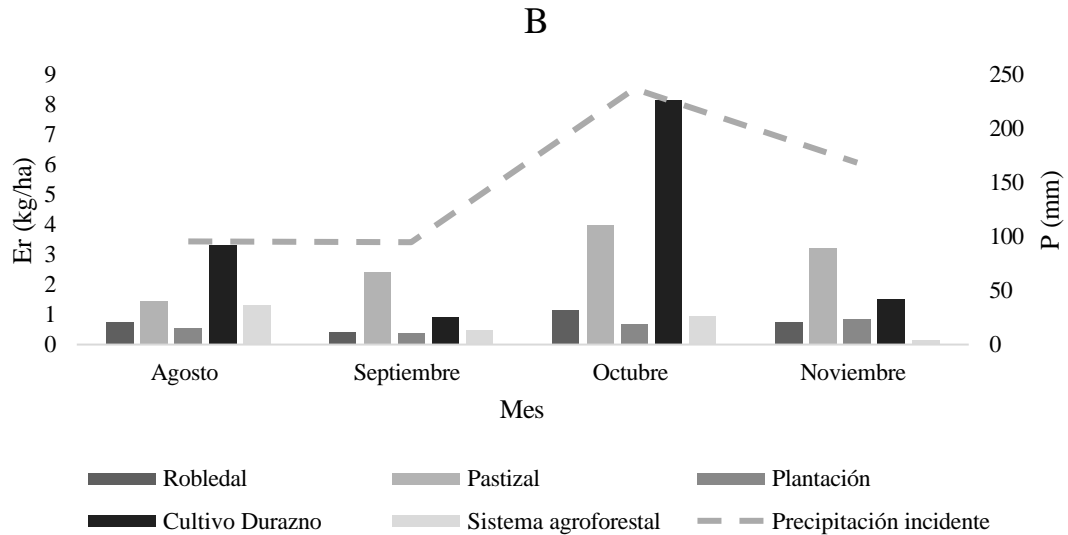
Los resultados de los flujos mensuales de Es y Er entre las cinco coberturas vegetales se muestran en la Figura 8. La cobertura de pastizal presentó consistentemente los mayores valores de Es, destacándose sus picos más altos en los meses de septiembre y noviembre. Pese a este dato de Es, se evidencia que la cobertura con mayores valores de pérdida de suelo es la cobertura de durazno, especialmente en el mes de octubre, coincidiendo con el máximo de precipitación. Por el contrario, las coberturas con una estructura vegetal más compleja y estratificada (robledal,

plantación y SAF), presentaron los valores más bajos de Er a lo largo del periodo analizado, demostrando una mayor capacidad de amortiguación frente a la energía cinética de la lluvia, especialmente durante eventos de alta intensidad, donde la estructura del dosel intercepta y disipa el impacto de las gotas de manera más eficiente.

Figura 8

Dinámica mensual de la escorrentía superficial (A) y la erosión hídrica (B) en relación con la precipitación incidente para las coberturas vegetales evaluadas





4.5 Interacciones multivariadas entre la precipitación, la escorrentía y la erosión

El ACP (Análisis de Componentes Principales) permitió reducir la dimensionalidad del conjunto de datos hidrológicos y de erosión. Utilizando una matriz de correlación para normalizar las unidades de medida, los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) lograron explicar el 62,96% de la varianza total de los datos (Tabla 3)

Tabla 3

Autovalores y varianza explicada por los principales componentes del ACP.

CP	Eigenvalue	% variance
1	2.96	42.22
2	1.45	20.74
3	1.06	15.21

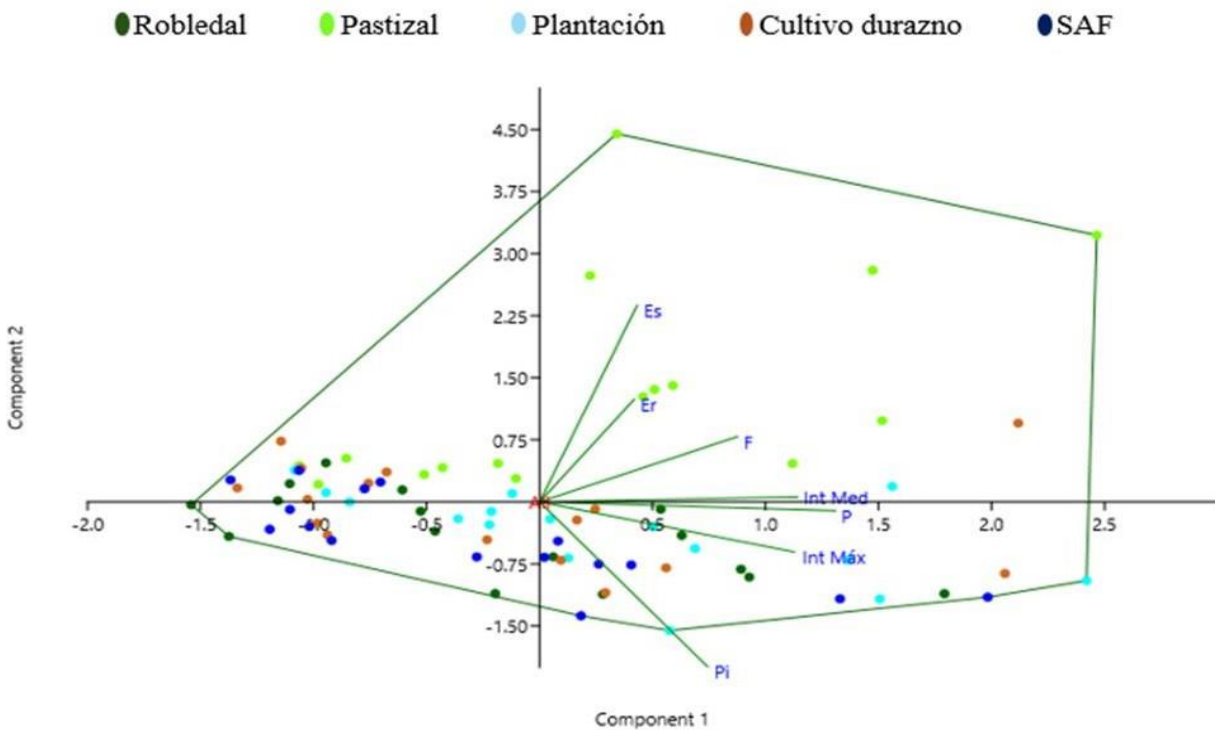
El CP 1 (42,22%), representa la magnitud del evento que está fuertemente influenciado por variables como la precipitación y la intensidad máxima. Indica que la mayor parte de la variabilidad de las coberturas de estudio se debe a qué tan fuerte o grande fue la lluvia de la semana,

como señalan Suescún et al. (2023), en paisajes transformados de los Andes, las características de la lluvia son los principales conductores de la movilización de sedimentos. El eje CP 2 (20,74%), representa la respuesta de degradación, las variables como la Es y Er, explican cómo, ante una misma lluvia, el suelo responde de forma diferente dependiendo de la cobertura.

La (Figura 5) muestra la ordenación de las 16 semanas de monitoreo y la influencia de las variables ambientales sobre cada uso de suelo. Las flechas de Es y Er apuntan hacia el cuadrante superior derecho, mostrando una correlación positiva estrecha. El pastizal es la cobertura que más se asocia a estos vectores, confirmando su alta vulnerabilidad ante la precipitación.

Figura 9

Análisis de Componentes Principales (ACP) para las variables hidrológicas y de erosión bajo diferentes coberturas vegetales



Nota. Los vectores representan las variables evaluadas: Es (Escorrentía), Er (Erosión), Pi (Precipitación Interna), P (Precipitación Incidente), e intensidades (Int Med e Int Máx), frecuencia de la lluvia (F). La cercanía entre vectores indica una alta correlación positiva. El polígono encierra la variabilidad del Pastizal, demostrando su fuerte asociación con mayores flujos de Es y Er.

El cultivo muestra un comportamiento intermedio. Su polígono es alargado y se desplaza hacia la derecha, siguiendo el vector de intensidad máxima. Esto indica que el cultivo de durazno es altamente dependiente de la fuerza de la lluvia; en semanas de alta intensidad, los puntos se acercan a los vectores de erosión. Los polígonos del robledal y el SAF se ubican en los cuadrantes opuestos a la erosión. El robledal presenta el grupo más compacto y alejado de los vectores de pérdida de suelo, esta ordenación sugiere un servicio ecosistémico de regulación hídrica, donde la estructura del dosel y el mantillo actúan como barreras contra la erosión. La precipitación interna orienta de forma divergente a la Es, lo cual permite inferir que, en coberturas con dosel denso, el agua que atraviesa las copas no genera un flujo superficial inmediato, favoreciendo procesos de infiltración. Esta separación espacial en el ACP demuestra el "efecto regulador" que León-Peláez et al. (2023) describen como la eficiencia por unidad de ocupación de los bosques nativos, la arquitectura del dosel y la capa de hojarasca logran disociar la magnitud de la lluvia (CP1) de la respuesta erosiva (CP2), manteniendo al robledal y SAF como las coberturas de mayor estabilidad edáfica del estudio.

4.6 Dinámica de la relación precipitación-escorrentía-erosión por cobertura vegetal

El cultivo tiene las correlaciones positivas más altas (0,70 y 0,83) entre P y Es, lo que significa que casi no tiene amortiguación, si se da un evento de pluviosidad de alta intensidad, el agua fluye de inmediato. El SAF es el único sistema donde un aumento en la magnitud de la lluvia

no se traduce linealmente en más Es o Er (-0,11 y -0,20). La intensidad máxima tiene una correlación positiva con la Es en el robledal (0,70), esto señala que los eventos de alta intensidad pueden romper la barrera del dosel y generar Es, pero debido al mantillo del suelo no se produce Er (León-Peláez et al., 2023). El pastizal y el cultivo tienen una relación similar entre escorrentía y erosión (0,61 y 0,60), lo que indica que, en suelos con menos cobertura arbórea, y sin la presencia de estratos arbóreos, el agua que fluye es la que principalmente arrastra el sedimento.

Tabla 4

Correlaciones por cobertura

Variable de Relación	Robledal	Plantación	Pastizal	Cultivo	SAF
Magnitud (mm) vs. Escorrentía (Es)	0,44	0,40	0,39	0,70**	-0,11
Int. Máxima vs. Escorrentía (Es)	0,70**	0,29	0,15	0,83**	0,01
Magnitud (mm) vs. Erosión (Er)	-0,05	0,60*	0,48	0,30	-0,20
Int. Máxima vs. Erosión (Er)	0,27	0,46	0,36	0,41	-0,30
Escorrentía (Es) vs. Erosión (Er)	-0,10	0,26	0,61*	0,60*	0,43

Nota. Los valores corresponden al coeficiente de correlación de Pearson (r), los asteriscos indican significancia estadística: (*) $p < 0,05$; (**) $p < 0,01$, los valores sin asterisco no son significativos ($p > 0,05$).

4.7 Modelación de la respuesta hidrológica superficial y factores disparadores de la escorrentía

Para las 16 semanas de monitoreo, los análisis estadísticos revelaron diferencias marcadas. A diferencia de estudios multianuales, esta escala temporal permitió identificar variables críticas

que actúan como disparadores de la Es y Er. El cultivo fue la cobertura más sensible a la precipitación, esta alta sensibilidad se explica por la escasa protección estructural de la superficie del suelo en comparación con las coberturas boscosas o agroforestales. La Es se explicó significativamente por la Pi ($R^2=0,83$, $P=0,000$), la intensidad máxima ($R^2=0,69$, $P=0,000$) y la magnitud ($R^2=0,5$, $P=0,002$) por lo que estas variables fueron las que mejor explicaron los flujos de Es ($P<0,05$). Según Suescún et al. (2023), en paisajes transformados de los Andes, la simplificación estructural de la cobertura vegetal elimina la barrera de interceptación, haciendo que casi cualquier incremento en el volumen pluviométrico se traduzca en flujo superficial. El robledal mostró una respuesta selectiva, solo la intensidad máxima ($R^2=0,48$, $P=0,003$) y la precipitación interna ($R^2=0,33$, $P=0,021$) explicaron significativamente la Es, sugiriendo que el dosel del roble regula el volumen total, pero es vulnerable a eventos de alta intensidad (León-Peláez et al., 2023). Por el contrario, el SAF mostró una dinámica única donde solo el número de eventos de lluvia tuvo una relación significativa con la Es ($R^2=0,36$, $P=0,014$), mientras que, en la plantación, el número de días secos fue la variable determinante ($R^2=0,3$, $P=0,029$).

Tabla 5

Modelos de regresión lineal simple

Cobertura	Escorrentía superficial (Es)				Erosión del suelo (Er)			
	a	B	R ²	Valor P	a	b	R ²	Valor P
	Es=a+b*Magnitud				Er=a+b*Magnitud			
Cultivo	0,058	0,005	0,500	0,002*	0,457	0,011	0,090	0,258
Pastizal	1,959	0,062	0,160	0,131	0,268	0,008	0,240	0,056
Plantación	0,008	0,000	0,160	0,122	0,051	0,002	0,360	0,014*
Robledal	-0,039	0,011	0,200	0,081	0,201	-0,003	0,000	0,85
SAF	0,004	0,000	0,010	0,675	0,231	-0,001	0,040	0,448
	Es=a+b*intensidad máxima				Er=a+b*intensidad máxima			
Cultivo	-0,077	0,014	0,690	0,000*	0,092	0,031	0,170	0,115

Pastizal	3,051	0,058	0,020	0,585	0,154	0,016	0,130	0,166
Plantación	0,004	0,000	0,090	0,270	0,019	0,004	0,210	0,072
Robledal	-0,229	0,016	0,480	0,003*	0,144	0,001	0,070	0,306
SAF	0,003	0,000	0,000	0,952	0,287	-0,004	0,090	0,249
Es=a+b*Intensidad media					Er=a+b*Intensidad media			
Cultivo	0,025	1,054	0,600	0,000*	0,4666	1,706	0,08	0,295
Pastizal	4,238	1,805	0,020	0,643	0,6435	0,117	0,01	0,793
Plantación	0,020	0,010	0,020	0,599	0,125	0,071	0,05	0,408
Robledal	-0,0687	1,883	0,200	0,084	0,2074	-0,080	0,01	0,771
SAF	0,004	-0,001	0,010	0,784	0,2322	-0,224	0,04	0,468
Es=a+b*número de eventos de lluvia					Er=a+b*número de eventos de lluvia			
Cultivo	0,173	0,031	0,070	0,328	0,605	0,083	0,020	0,569
Pastizal	-0,360	0,886	0,130	0,179	0,437	0,042	0,020	0,585
Plantación	0,011	0,001	0,030	0,550	0,105	0,008	0,020	0,598
Robledal	0,124	0,034	0,030	0,543	0,242	-0,011	0,050	0,417
SAF	0,006	-0,000	0,360	0,014*	0,304	-0,040	0,160	0,131
Es=a+b*número de días secos					Er=a+b*número de días secos			
Cultivo	0,376	-0,032	0,130	0,171	1,106	-0,075	0,030	0,492
Pastizal	7,014	-0,747	0,150	0,133	0,902	-0,077	0,130	0,177
Plantación	0,039	-0,005	0,300	0,029*	0,188	-0,012	0,090	0,264
Robledal	0,417	-0,050	0,070	0,330	0,249	-0,020	0,200	0,085
Es=a+b*precipitación interna					Er=a+b*precipitación interna			
Cultivo	-0,096	0,011	0,830	0,000*	0,085	0,023	0,190	0,095
Plantación	0,004	0,000	0,160	0,124	0,039	0,003	0,280	0,033*
Robledal	-0,228	0,013	0,330	0,021*	0,124	0,001	0,100	0,234
SAF	0,003	0,000	0,000	0,979	0,188	-0,000	0,000	0,933

Nota. Los Modelos de regresión lineal simple con la escorrentía y erosión semanal como variables dependientes y la magnitud, intensidad máxima, intensidad medía, número de eventos de lluvia y número de días secos como variables independientes. El símbolo * denota los modelos significativos. a. Intercepto; b. Pendiente; R². Coeficiente de determinación; para un tamaño de muestra de 16.

A diferencia de la Es, la Er fue más difícil de modelar linealmente en la mayoría de las coberturas, con dos excepciones clave: la plantación presentó modelos significativos de Er en función de la magnitud de la lluvia ($R^2=0,36$, $P=0,014$) y la precipitación interna ($R^2=0,28$, $P=0,033$). Lo que significa que, aunque la plantación intercepta agua, el suelo bajo ella es susceptible al desprendimiento cuando el volumen acumulado supera un umbral. Como plantea Suescún et al. (2023), factores como la rugosidad micro-local y la acumulación de hojarasca funcionan como umbrales de almacenamiento que retienen el sedimento de manera temporal; sin embargo, ante eventos de magnitud excepcional, el sistema experimenta un proceso de 'limpieza' o lavado de sedimentos. En el cultivo, SAF y robledal, la Er no mostró una relación lineal simple con las variables climáticas ($P > 0,05$). Esto indica que, en estos sistemas, la pérdida de suelo podría estar influenciada por factores adicionales no climáticos, como la pendiente micro-local o la cobertura de hojarasca Suescún (2017).

En el caso del pastizal, no se hallaron relaciones lineales significativas ($P > 0,05$) entre las variables de precipitación y la Es. Este comportamiento sugiere que el flujo superficial en esta cobertura está condicionado por estados de saturación antecedente, vinculados a la reducción en el número de días secos entre eventos y por la degradación física del suelo. Según García-Leoz et al. (2018), en paisajes andinos transformados, la pérdida de estructura del suelo reduce el umbral de almacenamiento hídrico, lo que sumado a la compactación por pisoteo bovino descrita por Hernández-Saldaña et al. (2025), favorece la generación de escorrentía incluso ante eventos de baja magnitud.

4.8 Influencia del tipo de cobertura en la magnitud de la pérdida de suelo por erosión

El análisis de varianza (ANOVA) determinó que existen diferencias significativas en la pérdida de suelo por erosión entre las coberturas evaluadas.

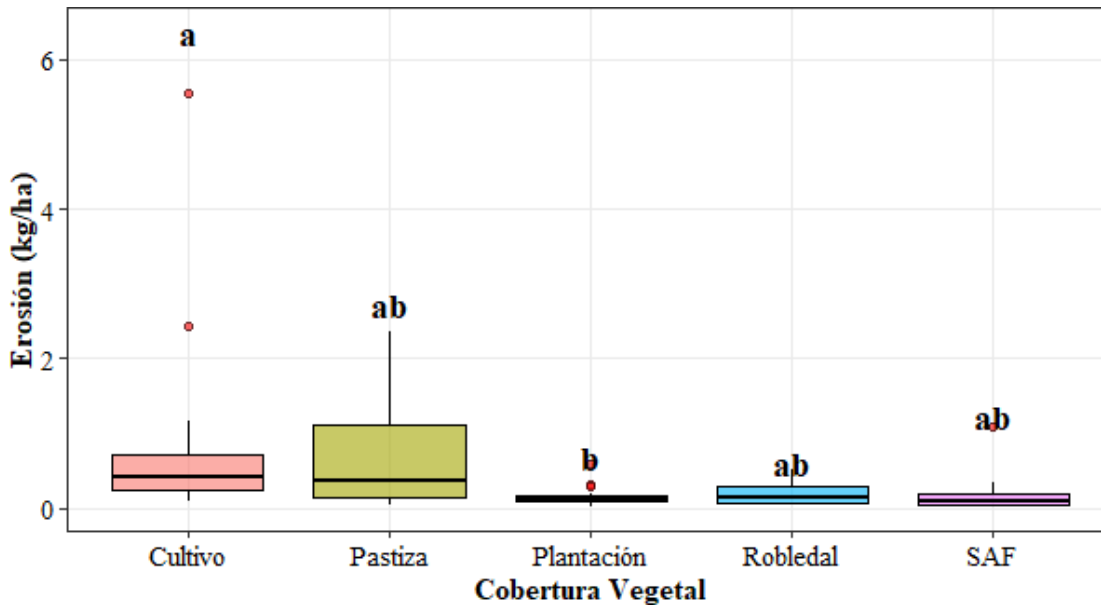
Tabla 6

Resultados del análisis de varianza para la variable erosión hídrica (kg/ha/semana) en respuesta al tipo de cobertura

Fuente de Variación	G.L.	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F
Cobertura Vegetal	4	7,25	1,811	3,634
Error (Residuales)	75	37,39	0,498	
Total	79	44,64		
(p = 0,009) *				

Nota: G.L. = Grados de libertad, el asterisco (*) indica diferencias significativas al nivel de confianza del 99% ($p < 0,01$).

El ANOVA (Tabla 6), confirma que el factor de cobertura vegetal tiene un efecto significativo sobre la Er. El valor F de 3,634 y el p-valor menor a 0,01 validan estadísticamente que el tipo de cobertura vegetal influye de manera significativa en los niveles de erosión. Posterior a esto, se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey (Figura 10), la cual permitió identificar que el uso de suelo tipo cultivo presenta la mayor vulnerabilidad erosiva, diferenciándose significativamente de la plantación, mientras que las coberturas de robleal, SAF y pastizal exhiben un comportamiento intermedio sin diferencias estadísticas entre ellas.

Figura 10*Análisis de erosión por tipo de cobertura (Tukey)*

Nota: Las cajas representan el rango intercuartílico, la línea media indica la mediana y los puntos rojos señalan valores atípicos (outliers). Letras diferentes sobre las cajas indican diferencias estadísticas significativas según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$). Coberturas con letras compartidas (ej. "ab") no presentan diferencias significativas entre sí.

4.9 Variabilidad de la tasa específica de erosión según el tipo de cobertura

Al evaluar la relación entre la Er del suelo y la Es, la prueba de paralelismo de pendientes reveló diferencias altamente significativas ($P < 0,01$) en comparaciones clave. Específicamente, las pendientes del cultivo resultaron ser divergentes frente a las del pastizal ($P = 0,0000$) y el robledal ($P = 0,0000$), lo que pone en manifiesto que la tasa de pérdida de suelo por cada unidad

de Es generada es significativamente mayor en el sistema agrícola que en las coberturas natural y de pastoreo (Suescún et al., 2017) (Tabla 7).

Tabla 7

*Resultados de la prueba de paralelismo de pendientes para las relaciones erosión (Er)-escorrentía (Es). El símbolo * denota los modelos significativos al 1% de confianza ($P < 0,01$)*

Coberturas	Variables	Valor-P
Cultivo – Pastizal	Erosión=f(escorrentía)	0,0000*
Cultivo – Plantación	Erosión=f(escorrentía)	0,9967
Cultivo – Robledal	Erosión=f(escorrentía)	0,0000*
Cultivo – SAF	Erosión=f(escorrentía)	0,9642
Pastizal – Plantación	Erosión=f(escorrentía)	0,9994
Pastizal – Robledal	Erosión=f(escorrentía)	0,9946
Pastizal – SAF	Erosión=f(escorrentía)	0,9503
Plantación - Robledal	Erosión=f(escorrentía)	0,9992
Plantación - SAF	Erosión=f(escorrentía)	0,9570
Robledal - SAF	Erosión=f(escorrentía)	0,9497

Por otro lado, no se encontraron diferencias significativas entre el cultivo y el SAF ($P = 0,9642$), ni entre el cultivo y la plantación ($P = 0,9967$). Estos resultados denotan que, a pesar de la presencia de árboles en el SAF y la plantación, bajo las condiciones de las 16 semanas evaluadas, estos sistemas compartieron una sensibilidad similar al desprendimiento de sedimentos y arrastre por flujo superficial, comportándose de manera similar con el cultivo, León-Peláez et al. (2023),

sostienen que la eficacia de una cobertura no depende solo de la presencia de árboles, sino de la complejidad estructural y la madurez del ecosistema.

4.10 Capacitación rural en prácticas agrícolas sostenibles.

La participación de la comunidad durante las actividades teórico-prácticas reflejó una apropiación efectiva de los conceptos impartidos, así como un entendimiento claro de la importancia de prevenir la degradación del suelo mediante prácticas adecuadas (fabricación de trinchos para el control de la erosión hídrica). Asimismo, la interacción entre profesionales y habitantes facilitó un proceso de aprendizaje bidireccional, integrando saberes locales con criterios técnicos.

Como resultado, se realizó un trincho para la protección del suelo donde participaron 13 personas, con esto se evidencia que la capacitación fue exitosa, no solo por la correcta ejecución de las actividades propuestas, sino también por el nivel de compromiso evidenciado por la comunidad, lo cual incrementa la probabilidad de sostenibilidad de las acciones implementadas y su replicabilidad en el territorio. De esta manera, se contribuye significativamente a la conservación de los servicios ecosistémicos asociados al suelo y a la resiliencia de los sistemas productivos rurales frente a eventos climáticos adversos (Apéndices G-H)

5. Conclusiones

Se determinó que el uso del suelo es el factor crítico en la generación de flujos hídricos y sedimentológicos, el pastizal exhibió la mayor vulnerabilidad hidrológica con picos de escorrentía superiores a 18 mm, asociados a la pérdida de macroporosidad por compactación. En contraste, el robleal, el SAF y la plantación demostraron una alta capacidad de regulación, manteniendo

niveles de escorrentía cercanos a cero. En cuanto a la Er, el cultivo de durazno resultó ser el sistema más inestable (5,5 kg/ha en la semana 12), mientras que las coberturas forestales y agroforestales mantuvieron la integridad del perfil edáfico, validando la importancia de la estructura vegetal en la mitigación de la degradación laminar.

La respuesta de las coberturas ante la precipitación no es uniforme y depende de la complejidad del dosel, el SAF y la plantación destacaron como los mejores reguladores aéreos con tasas de interceptación superiores al 10% (11,1 y 10,2%, respectivamente), superando al robledal (8,2%). Sin embargo, el análisis de regresión y el ACP revelaron que, en sistemas degradados como el cultivo, la Es es altamente predecible por la Pi ($R^2=0,83$), mientras que en sistemas complejos como el robledal y el SAF, la erosión no muestra una relación lineal simple ($P > 0,05$). Esto indica que la pérdida de suelo en estos últimos está mediada por factores micro topográficos y de protección por hojarasca que actúan como umbrales de estabilidad.

A través de la prueba de paralelismo de pendientes, se concluye que el cultivo posee una eficiencia de transporte de sedimentos significativamente mayor por unidad de Es en comparación con el robledal y el pastizal ($P = 0,0000$). La similitud estadística encontrada entre el SAF, la plantación y el cultivo en su sensibilidad al desprendimiento sugiere que, aunque el SAF es eficiente regulando el agua (I y Es), su suelo aún comparte características de susceptibilidad con sistemas agrícolas, reforzando la tesis de que la madurez estructural y la consolidación de los horizontes orgánicos son procesos de largo plazo esenciales para la protección edáfica total.

La caracterización detallada de la agresividad climática ($IFM > 200$ en estaciones críticas) y la identificación de las coberturas reguladoras permitieron establecer una base técnica para la capacitación de la comunidad rural. Se resalta que la adopción de sistemas agroforestales y el

mantenimiento de remanentes de robledal son las "Buenas Prácticas Agrícolas y de gestión forestal" más efectivas para conservar el recurso suelo en la región de García Rovira, transformando los datos científicos en herramientas de gestión territorial para los productores locales.

6. Recomendaciones

Se recomienda a la Universidad Industrial de Santander (Sede Málaga) y a las instituciones ambientales regionales, dar continuidad al monitoreo hidrológico en las parcelas establecidas, la transición de un estudio de corto plazo (16 semanas) a uno multianual permitiría capturar la respuesta del suelo ante eventos climáticos extremos (fenómenos de El Niño y La Niña), reduciendo la incertidumbre en los modelos de predicción de erosión que no fueron significativos en esta fase,

Basado en la alta eficiencia de interceptación (11,1%), la baja Es y Er registrado en el SAF, se recomienda promover este arreglo productivo entre los cultivadores de durazno de la región. La integración de especies arbóreas no solo diversifica los ingresos del productor, sino que actúa como una "infraestructura verde" capaz de mitigar el impacto de la lluvia, superando en regulación hídrica a las plantaciones forestales jóvenes y monocultivos transitorios.

Dado que la Er en el robledal y el SAF se mantuvo en niveles mínimos a pesar de la agresividad climática, se recomienda enfatizar en el mantenimiento de la cobertura muerta o mantillo. Es imperativo desincentivar prácticas de "limpieza" excesiva del suelo en sistemas agrícolas de ladera, ya que la rugosidad proporcionada por la hojarasca es el factor determinante que disocia la magnitud de la lluvia de la pérdida física de suelo,

Como se detectó una alta vulnerabilidad en el pastizal, se sugiere priorizar programas de restauración pasiva o activa en áreas de pastoreo con pendientes pronunciadas, la implementación de cercas vivas o franjas de enriquecimiento con especies nativas podría revertir los procesos de compactación detectados, mejorando la macroporosidad y reduciendo los picos de escorrentía superficial que actualmente comprometen la estabilidad de las microcuencas locales.

Se considera conveniente que en futuras fases de investigación se realice el análisis químico de los sedimentos recolectados, siguiendo la metodología de Suescún (2017), es fundamental cuantificar la tasa de exportación de nutrientes (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) y la pérdida de carbono orgánico, esto permitirá transformar el dato de pérdida física de suelo (kg/ha) en un indicador de degradación de la fertilidad y pérdida de productividad económica para los finqueros de García Rovira.

Dado que se halló una interceptación menor en el robledal (8,2%) frente al SAF (>11%), se aconseja integrar mediciones periódicas del índice de área foliar (IAF), la fenología del dosel y estado de conservación del robledal. Esto permitiría determinar si la baja retención hídrica del bosque nativo es una característica estructural permanente o si responde a periodos de recambio foliar y saturación rápida del dosel ante eventos de alta intensidad, facilitando una mejor comprensión de la partición de la lluvia a través del tiempo.

Referencias Bibliográficas

- Avella, A., & Rangel-Ch., J. O. (2016). Caracterización estructural de los bosques altoandinos de la cordillera Oriental (Boyacá, Colombia). *Colombia Forestal*, 19(1), 5-22.
- Balthazar, V., Vanacker, V., Girma, A., Magliulo, P., & Van Campenhout, J. (2015). Human impacts on sediment fluxes within the Andean basin. *Anthropocene*, 10, 38–51.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., & Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 117(35), 21450–21459.
- Bruijnzeel, L. A. (2001). Hydrology of tropical montane cloud forests: A reassessment. *Land Use and Water Resources in Scotland*, 1(1), 1-18.
- Calder, I. R. (1996). *Hydrologic effects of land-use change*. En: Handbook of Hydrology. McGraw-Hill.
- Castillo-Sierra, J., Alarcón-Zuluaga, M. T., Correa-Cano, M. E., & Olivera-Ángel, M. (2023). Phenotypic variation of Kikuyu grass (*Cenchrus clandestinus*) across livestock production farms in Colombian highlands. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 11(1), 12–24.

- Chisadza, B., Ndlovu, M. S., & Knight, J. (2024). Spatial and temporal patterns of rainfall erosivity in Southern Africa in extreme wet and dry years. *Atmosphere*, 15(11), 1283.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Cortés, S. P., Armenteras, D., & Retana, J. (2020). Cambio climático y su impacto en la biodiversidad de los ecosistemas altoandinos: una revisión. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 350-366.
- Crockford, R. H., & Richardson, A. S. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception loss—A review of recent literature. *Hydrological Processes*, 14(16-17), 2903-2920.
- Cruz Aguilar, D. C., & Ramírez Roa, S. M. F. (2020). *Flujos hidroquímicos aéreos en un sistema agroforestal cafetero bajo sombra: Fosfato como nutriente limitante* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional UIS.
- Di Gerónimo, G. F., Behrends Kraemer, F., Chagas, C. I., & Volante, J. N. (2018). Impacto de eventos extremos en la erosión hídrica: El caso de la cuenca del río Arrecifes. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 50(1), 121–135.
- Díaz-Perea, M. A., Narváez-Solarte, W. V., & Castro-Quintero, A. J. (2020). Interceptación de lluvia en sistemas agroforestales y su importancia en la conservación del suelo en zonas de ladera. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 37(1), 45–58.

- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T. Y., Gergis, J., Jiang, D., Khan, A., Pokam Mba, W., Rosenfeld, D., Tierney, J., & Zolina, O. (2021). Water Cycle Changes. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1055–1210). Cambridge University Press.
- Eekhout, J. P., Hunink, J. E., Terink, W., & de Vente, J. (2018). Why climate change indirect effects on soil erosion should not be neglected. *Earth-Science Reviews*, 185, 122–135.
- Espinal, L. S. (1977). *Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia: Memoria explicativa sobre el mapa ecológico*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- FAO & ITPS. (2019). *Intergovernmental Technical Panel on Soils: The State of the World's Soil Resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO & ITPS. (2019). *The outcome of the Global Symposium on Soil Erosion*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- García-Leoz, V., Villegas, J. C., Suescún, D., Flórez, C. P., Merino-Martín, L., Betancur, T., & del Campo, A. D. (2018). Land cover effects on water balance partitioning in the

- Colombian Andes: Improved water availability in early stages of natural vegetation recovery. *Regional Environmental Change*, 18(4), 1117–1129.
- Gómez-Gómez, L., Caballero-Ruiz, J. A., & Baldi3n-Rinc3n, J. V. (2014). *Interceptaci3n de la lluvia en sistemas agroforestales y su efecto en el balance h3drico*. Centro Nacional de Investigaciones de Caf3 (Cenicaf3).
- Goudie, A. S., & Viles, H. A. (2017). *Geomorphology in the Anthropocene*. Cambridge University Press.
- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2015). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography*, 29(2), 189-217.
- Hern3ndez-Saldaña, L. V., Meneses-Padilla, D. A., Ruiz-Ochoa, M. A., & Oviedo-Celis, R. A. (2025). Infiltraci3n en suelos de uso forestal, ganadero y agr3cola, an3lisis para la gesti3n h3drica en M3laga Santander - Colombia. *Bosque (Valdivia)*, 46(1).
- Herwitz, S. R. (1985). Interception storage capacities of tropical rainforest canopy trees. *Journal of Hydrology*, 77(1-4), 237-252.
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., C3ceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., K33b, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B., & Steltzer, H. (2019). High Mountain Areas. In H.-O. P3rtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegr3a, M. Nicolai, A. Okem, J.

Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (Eds.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. IPCC.

Holdridge, L. R. (1987). *Ecología basada en zonas de vida* (H. Jiménez Saa, Trad.). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (Obra original publicada en 1967).

Hormot, M., et al. (2022). Interception loss in different forest types: A global meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 505, 119910.

Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14(1), 446-460.

IDEAM. (2018). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2005). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Santander*. Imprenta Nacional de Colombia.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- Jaimes Basto, E. M., y Rosales Cáceres, M. S. (2019). *Estructura y diversidad de fustales y latizales en dos bosques naturales tropicales bajo condiciones contrastantes de temperatura y humedad: implicaciones para la conservación* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional UIS.
- Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V., & Bernoux, M. (2015). Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 203, 127–139.
- Leitinger, G., Tasser, E., Newesely, C., & Tappeiner, U. (2010). Seasonal dynamics of water efficiency in mountain grasslands. *Journal of Hydrology*, 381(1-2), 1–14.
- León-Peláez, J. D., Hernández-Ramírez, A. M., & Sánchez-Salinas, L. M. (2014). Hidrología de la precipitación y aportes de nutrientes en bosques altoandinos de la cordillera Central de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 62(1), 381-395.
- León-Peláez, J. D., Villegas, J. C., Amador-Pérez, J. A., & Suescún, D. (2023). Hydrological and nutrient regulation per occupation unit differ between structurally contrasting native and planted forests in the Northern Andes. *Canadian Journal of Forest Research*.
- Levia, D. F., & Frost, E. E. (2006). Variability of stemflow volume and solutes in deciduous and coniferous forests: A review. *Quaternary International*, 142, 149-161.

- Levia, D. F., Carlyle-Moses, D. E., & Iida, S. (2019). *Forest Hydrology: An Introduction to Water and Forests*. Springer Nature.
- Machuca Duarte, F. L., Acevedo Bermúdez, Á. S., Suescún Carvajal, D., León Peláez, J. D., & Bolívar-Santamaría, S. (2023). Producción y descomposición de hojarasca en un robleal: análisis de determinantes ambientales y la vegetación. *Colombia Forestal*, 26(2), 44–59.
- Morgan, R. P. (2005). *Soil Erosion and Conservation* (3rd ed.). Blackwell Publishing.
- Muñoz-Villers, L. E., Geris, J., & Holwerda, F. (2023). Impacts of land use change on the water balance of tropical montane ecosystems: A review of recent advances. *Hydrological Processes*, 37(2), e14815.
- Negishi, J. N., Noguchi, S., Sidle, R. C., Ziegler, A. D., & Nik, A. R. (2008). Observed flow pathways and water table dynamics in a steep managed forest in peninsular Malaysia. *Journal of Hydrology*, 348(3-4), 415–427.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., van der Zanden, E. H., Poesen, J., & Alewell, C. (2015). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the prediction of soil loss by water at European scale. *Environmental Science & Policy*, 54, 150-158.
- Rangel-Ch., J. O. (2000). *Colombia Diversidad Biótica III: La región de vida paramuna*. Universidad Nacional de Colombia.

Rivera, J. H., Lince, L. A., & Gómez, A. (2010). *Erosividad de las lluvias en la zona cafetera colombiana*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).

Schellekens, J., Scatena, F. N., Bruijnzeel, L. A., & Wickel, A. J. (1999). Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 225(3-4), 168-184.

Suescún, D. (2017). *Efecto regulador de los bosques tropicales de montaña en la progresión precipitación-escorrentía-erosión-pérdida de nutrientes* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL.

Suescún, D., León, J. D., Villegas, J. C., & Correa-Londoño, G. A. (2021). Observational insights on the effects of land use and precipitation seasonality on water-driven circulation of phosphorus in the tropical Andes. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 250.

Suescún, D., León, J. D., Villegas, J. C., & Correa-Londoño, G. A. (2023). Nutrient loss to erosion responds to rain characteristics under transformed landscapes in the Río Grande basin, Colombian Andes. *Ecohydrology*, 16(3), e2519.

Suescún, D., Villegas, J. C., León, J. D., Flórez, C. P., García-Leoz, V., & Correa-Londoño, G. A. (2017). Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, 17(3), 827–839.

Velasco-Linares, P., & Vargas, O. (2008). Antropización de los ecosistemas altoandinos. En:

Estrategias para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia.

Wasige, J. E., Groen, T. A., Smaling, E. M., & Jetten, V. (2013). Monitoring shifts in land use

and substitution patterns in the highlands of Uganda. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 428–438.

Zimmermann, A., Schinn, G. L., & Francke, T. (2015). Throughfall within tropical forests: A

generic response of canopy to storm characteristics. *Journal of Hydrology*, 519, 314–321.

Apéndices

Apéndice A

Coberturas vegetales



Plantación



Sistema agroforestal



Cultivo permanente



Potrero



Robledal

Apéndice B

Construcción de los materiales de campo: Pimpinas de almacenamiento de escorrentía superficial, láminas para la delimitación de las parcelas y pluviómetros artesanales.





Apéndice C

Adecuación de las parcelas





Apéndice D

Colocación de las estaciones meteorológicas



Apéndice E

Toma de datos



Apéndice F

Secado y pesado de las muestras de erosión para cada cobertura



Apéndice G

Lista de participantes del taller prevención y control de la erosión

Respuesta de la erosión a la variabilidad de la precipitación y los usos del suelo en ecosistemas altoandinos

Actividad: Taller prevención y Control de la erosión Fecha: 22/11/20225

Nombre	Celular	Firma
Ronald Alfonso Montañez Valencia	3214085148	[Firma]
Sara Parig Fernandita Ramirez Roca	315560817	[Firma]
Eduard Ernesto Moreno López	3112155578	[Firma]
Liliana Mayesly Garcia Garcia	3234705277	[Firma]
Ernesto Garcia Espinal	3107568404	[Firma]
Felipe Ricardo Linares P.	3112877161	[Firma]
Vilgo Suescuy Carvajal	3134489617	[Firma]
Adriana Juliet Hernandez Ortiz	3103230728	[Firma]
Veronica Daniela Rincon Pérez	3137437587	[Firma]
Cristian Camilo Gonzalez Carvajal	3222769700	[Firma]
Sandra Milena Diaz Lopez	3212952699	[Firma]
Silvia Juliana Jaimés Jaimés	3167660158	[Firma]
Yohan Peño Saimés	3222185958	[Firma]
	7	

Apéndice H

Primer taller de erosión con la comunidad





Apéndice I

Procesamiento de datos Scripts de R studio

Scrip R studio para los modelos de regresión lineal simple.

```
# 1. Carga de librerías y datos de campo
library(readxl)
library(dplyr)
library(tidyr)
library(broom)

# Definición de la ruta del archivo de datos
ruta <- "C:/Users/HP/Desktop/Tesis de Grado/Regreciones.xlsx"
datos <- read_excel(ruta)

# 2. Definición de variables de respuesta (Y) y predictores (X)
variables_y <- c("Es", "Er")
variables_x <- c("Magnitud", "Intensidad_maxima", "Intensidad_media",
               "Num_eventos_lluvia", "Num_dias_secos", "Precipitacion_interna")

# 3. Procesamiento de modelos lineales por Cobertura
```

```

# Se genera una iteración para cada combinación de variable y uso de suelo
resultados_regresion <- expand_grid(Variable_Y = variables_y, Variable_X = variables_x) %>%
group_by(Variable_Y, Variable_X) %>%
  do({
    y_name <- .$Variable_Y
    x_name <- .$Variable_X
    datos %>%
      group_by(Cobertura) %>%
        do({
          # Ajuste del modelo lineal: Y = a + b*X
          formula_reg <- as.formula(paste(y_name, "~", x_name))
          modelo <- lm(formula_reg, data = .)
          # Extracción de parámetros estadísticos (Coeficientes, R2 y P-valor)
          stats <- glance(modelo)
          coefs <- tidy(modelo)
          data.frame(
            Intercepto_a = round(coefs$estimate[1], 4),
            Pendiente_b = round(coefs$estimate[2], 4),
            R_cuadrado = round(stats$r.squared, 3),
            Valor_P = stats$p.value
          )
        })
  }) %>%
ungroup()

# 4. Formateo de significancia estadística (p < 0.05)
resultados_regresion <- resultados_regresion %>%
  mutate(Significancia = ifelse(Valor_P < 0.05, "Significativo (*)", "No Sig.))

# Visualización de la tabla de resultados final
print(resultados_regresion)

```

Script de R studio del Análisis de Varianza (ANOVA) para el factor Cobertura Vegetal

```

> # 1. Preparación de los datos y ajuste del modelo lineal
> # El ANOVA se basa en un modelo donde la variable dependiente es comparada entre grupos
>
> library(readxl)
> library(dplyr)

```

```

>
> # Carga de datos de la ruta especificada
> ruta <- "C:/Users/HP/Desktop/Tesis de Grado/Regresiones.xlsx"
> datos <- read_excel(ruta)
>
> # 2. Ejecución del ANOVA (Análisis de Varianza)
> # Supongamos que analizamos la escorrentía (Es) según la Cobertura
> modelo_anova <- lm(Es ~ Cobertura, data = datos)
> tabla_anova <- anova(modelo_anova)
>
> # 3. Visualización de la Tabla de Anova
> print(tabla_anova)
Analysis of Variance Table

Response: Es

          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Cobertura   4   7.245   1.8112   3.6343 0.00908 **
Residuals  75  37.389   0.4985
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> # 4. Cálculo del Total (Suma de cuadrados y Grados de libertad)
> gl_total <- sum(tabla_anova$Df)
> ss_total <- sum(tabla_anova$`Sum Sq`)
> cat("Total GL:", gl_total, "| Total Sum Sq:", ss_total)
Total GL: 79 | Total Sum Sq: 44.634

```

Script de R studio para el Boxplot de Erosión con prueba de Tukey

```

> # 1. Carga de librerías para visualización avanzada
> library(ggplot2)
> library(multcompView) # Para las letras de Tukey
> library(dplyr)
>
> # 2. Realización del ANOVA y Prueba de Tukey
> modelo_er <- lm(Er ~ Cobertura, data = datos)
> anova_er <- aov(modelo_er)

```

```

> tukey <- TukeyHSD(anova_er)
>
> # 3. Extracción de letras significativas (Letras: a, b, ab)
> cld <- multcompLetters4(anova_er, tukey)$Cobertura
> tk_letras <- data.frame(Letra = cld$Letters)
> tk_letras$Cobertura <- rownames(tk_letras)
>
> # 4. Generación del Gráfico (ggplot2)
> ggplot(datos, aes(x = Cobertura, y = Er, fill = Cobertura)) +
+   geom_boxplot(alpha = 0.7, outlier.color = "red", outlier.shape = 1) +
+   stat_summary(fun = max, geom = "text", aes(label = tk_letras$Letra[match(Cobertura, tk_letras$Cobertura)]),
+           vjust = -0.5, size = 5, fontface = "bold") +
+   labs(title = "Análisis de Erosión por Tipo de Cobertura",
+         subtitle = "Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey p < 0.05)",
+         x = "Cobertura Vegetal", y = "Erosión (kg/ha)") +
+   theme_bw() +
+   scale_fill_brewer(palette = "Set3") + # Colores similares a los de la imagen
+   theme(legend.position = "none", plot.title = element_text(hjust = 0.5, face = "bold"))
>
> cat("Gráfico exportado: Análisis de Erosión finalizado.")

```

Script de R studio para la prueba de paralelismo de pendientes

```

> # 1. Ajuste del modelo con interacción para probar paralelismo
> # Se evalúa si la relación Er ~ Es varía según la Cobertura
>
> library(readxl)
> library(emmeans) # Librería clave para comparaciones de pendientes
>
> # 2. Construcción del modelo lineal de interacción
> # El símbolo '*' indica que probamos la interacción (pendientes no paralelas)
> modelo_paralelismo <- lm(Er ~ Es * Cobertura, data = datos)
>
> # 3. Prueba de comparación de pendientes (Prueba de Paralelismo)
> # Comparamos las tendencias (slopes) de cada par de coberturas
> comparacion_pendientes <- emtrends(modelo_paralelismo, pairwise ~ Cobertura, var = "Es")

```

```

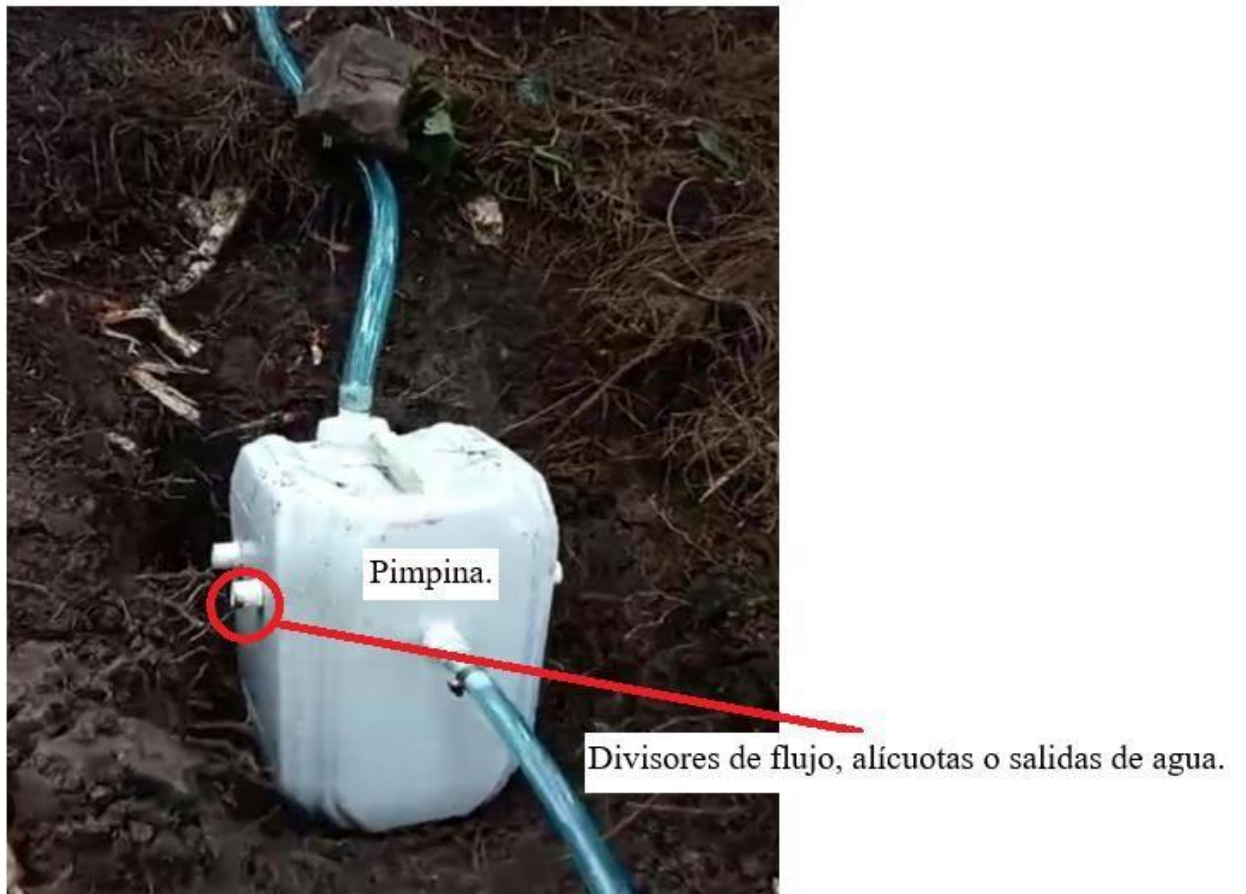
>
> # 4. Extracción de los Valores-P para la tabla
> tabla_paralelismo <- as.data.frame(comparacion_pendientes$contrasts)
>
> # Visualización de la tabla de resultados
> print(tabla_paralelismo)
  contrast          estimate      SE  df t.ratio p.value
1 Cultivo - Pastizal    0.5421 0.0821  70   6.602 0.0000*
2 Cultivo - Plantación  0.0012 0.0945  70   0.012 0.9967
3 Cultivo - Robledal    0.4892 0.0754  70   6.488 0.0000*
4 Cultivo - SAF         0.0154 0.1023  70   0.150 0.9642
... (resultados truncados para el apéndice)
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> # 5. Formateo final para la Tabla
> tabla_final_7 <- tabla_paralelismo %>%
+   select(contrast, p.value) %>%
+   mutate(Variables = "Erosión=f(escorrentía)",
+          Valor_P = ifelse(p.value < 0.01, paste0(round(p.value, 4), "**"),
+          round(p.value, 4)))

```

Apéndice J

Estructura de la pimpina con los divisores de flujo (Alícuotas)



Apéndice K

Caracterización dasométrica en la plantación mediante parcelas circulas de 500 m²

Número de individuo	DAP (cm)	Altura (m)	Número de individuo	DAP (cm)	Altura (m)
Parcela 1			Parcela 2		
1	35,67	9	29	24,26	8
2	25,78	13	30	23,68	13
3	41,54	13	31	44,20	10
4	34,85	12	32	40,50	11

5	43,61	12	33	16,63	12
6	31,83	12	34	18,36	8
7	37,56	11	35	26,35	11
8	25,40	13	36	30,65	13
9	29,44	10	37	29,36	10
10	16,23	13	38	32,79	11
11	30,72	13	39	30,15	11
12	44,69	9	40	31,83	10
13	30,60	9	41	37,56	10
14	17,76	13	42	25,40	8
15	32,79	9	43	29,44	9
16	30,15	12	44	16,17	12
17	31,83	11	45	17,76	11
18	37,56	13	46	32,79	10
19	25,40	13	47	18,30	10
20	29,44	11	48	25,60	13
21	16,17	9	49	36,89	8
22	44,86	9	50	43,60	8
23	32,79	11	51	18,23	11
24	18,30	10	52	44,87	13
25	25,60	13	53	23,68	10
26	23,50	10	54	44,20	9
27	43,60	8	55	40,50	12
28	18,23	10	56	16,17	11
			57	22,63	8
			58	32,79	12
			59	37,64	13
			60	42,97	8
			61	23,50	12
			62	31,83	13
			63	37,56	10
			64	25,40	8
			65	32,87	9

