

**Flujos hidroquímicos aéreos en un sistema agroforestal cafetero bajo sombra:
Fosfato como nutriente limitante**

Diana Camila Cruz Aguilar

Sara María Fernanda Ramírez Roa

Proyecto de Grado para Optar el Título de Ingeniero Forestal

Director

Diego Suescún Carvajal

MSc Bosques y Conservación Ambiental

Codirectora

Erika Mayerly Celis Celis

Química

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia- IPRED

Programa de Ingeniería Forestal

Bucaramanga, Santander

2020

Dedicatoria

A mi familia pues ellos fueron el cimiento para la construcción de mi vida profesional en especial a mi madre *María Aguilar* quien sembró en mí el amor por los bosques y con su inmenso amor y entrega me impulso a cumplir mis metas.

A mi hermana *Ángela Cruz* quien ha sido mi guía, me apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, ser aliento constante siempre dispuesta para escucharme en cualquier momento.

A mi hermano *Diego Cruz* por creer en mí, contagiarme de su amor por el campo y quien me animo a pensar que valía la pena cada esfuerzo.

A mi compañera de tesis *Sara Ramírez* por permitirme trabajar junto a ella, además de toda la paciencia y los largos días de trabajo académico para cumplir con nuestros objetivos.

Diana Camila Cruz Aguilar

Este trabajo lo dedico con mucho cariño y amor a mi mamá *Amparo Roa* y a mi papá *Fabio Ramírez*, pues soy el fruto de su entrega, esfuerzo y educación, a mis hijos *Alejandro* y *Samuel*, siempre serán mi motor; a mi nonita *Stella* por todas sus formas de dar aliento para siempre continuar, a mis hermanos y a toda mi familia cion toda mi gratitud e infinito cariño. A mi compañera *Diana Camila Cruz Aguilar*, por todo el apoyo, entendimiento, compañerismo y sincera amistad, este proyecto me sirvió para generar lazos de hermandad...

Te amo baby.

Sara María Fernanda Ramírez Roa

“Mira profundamente en la naturaleza y entonces comprenderás todo mejor”

Albert Einstein



Agradecimientos

Infinita gratitud a la Universidad Industrial de Santander, por abrir sus puertas a nuestras vidas y enfocarlas hacia la investigación y la academia, indiscutiblemente a nuestros maestros y compañeros por el apoyo, la motivación y todas las experiencias vividas

De forma especial a nuestro director de tesis Diego Suescún Carvajal por seguir nuestras ideas y ayudarnos a hacerlas realidad, a Stella Ramírez de Roa y Sotero Roa Moreno por el sin fin de ayudas y por ofrecernos el calor de su hogar que siempre nos llenaba de energía,

José Julián Ibáñez Ramírez por su múltiples ayudas y constante apoyo;

A todas aquellas personas que de una u otra forma aportaron en nuestro proceso; y porque que no al bosque, por permitirnos conocerlo y a hurtadillas entrar en su magia y secretos más íntimos, razón de ser de nuestro proyecto de vida.

Tabla de contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Introducción | 13 |
| Objetivos | 15 |
| Objetivo general | 15 |
| Objetivos específicos | 15 |
| Antecedentes | 16 |
| 1. Marco referencial | 17 |
| 1.1 Marco teórico | 17 |
| 1.1.1 Sistema agroforestal | 17 |
| 1.1.2 Flujos hídricos | 17 |
| 1.1.3 Precipitación..... | 18 |
| 1.1.4 Precipitación interna..... | 19 |
| 1.1.5 Escorrentía cortical..... | 20 |
| 1.1.6 Interceptación | 20 |
| 1.2 Marco conceptual | 20 |
| 2. Metodología | 21 |
| 2.1 Área de estudio..... | 21 |
| 2.2 Instalación de collarines y pluviómetros | 22 |
| 2.2.1 Escorrentía cortical..... | 22 |

| | |
|---|----|
| 2.2.2 Precipitación incidente | 23 |
| 2.2.3 Precipitación interna..... | 23 |
| 2.3 Toma de datos | 23 |
| 2.4 Análisis de laboratorio | 24 |
| 2.5 Análisis de datos | 24 |
| 2.5.1 Flujos hidrológicos..... | 24 |
| 2.5.2 Flujos de fosfato..... | 24 |
| 2.6 Procesos de intercambio químico..... | 24 |
| 3. Resultados | 25 |
| 3.1 Flujos hidrológicos..... | 25 |
| 3.2. Movimiento de fosfato a través del sistema agroforestal..... | 26 |
| 3.2.1 Valores de concentración | 26 |
| 3.2.2 Flujos de fosfato..... | 27 |
| 3.3 Procesos de intercambio de nutrientes | 28 |
| 3.3.1 Relación de concentración | 28 |
| 3.3.2 Deposición neta..... | 29 |
| 4. Discusión..... | 31 |
| 3. Conclusiones | 33 |
| Recomendaciones..... | 34 |
| Referencias bibliográficas | 35 |

Apéndice41

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Valores medios semanales de flujos hidrológicos25

Lista de Figuras

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1 Área de estudio en el municipio de San José de Miranda | 22 |
| Figura 2 Valores medios semanales de precipitación, precipitación interna y escorrentía cortical..... | 26 |
| Figura 3 Concentración de fosfato..... | 27 |
| Figura 4 Flujos hidroquímicos | 28 |
| Figura 5 Relación de concentración..... | 29 |
| Figura 6 Deposición neta | 30 |

Lista de apéndices

| | Pág. |
|---|-------------|
| Apéndice A. Elaboración de pluviómetros artesanales | 41 |
| Apéndice B. Preparación de los tubos para los pluviómetros | 42 |
| Apéndice C. Limpieza de la corteza para instalación de collarines | 43 |
| Apéndice D. Pluviómetros debajo del dosel para medir la precipitación interna | 44 |
| Apéndice E. Pegado de mangueras alrededor de la corteza | 45 |
| Apéndice F. Sistema agroforestal cafetero | 46 |
| Apéndice G. Fijación de collarines a la corteza de los árboles. | 47 |

Resumen

Título: Flujos hidroquímicos aéreos en un sistema agroforestal cafetero bajo sombra: fosfato como nutriente limitante¹

Autores: Diana Camila Cruz Aguilar, Sara María Fernanda Ramírez Roa²

Palabras clave: Precipitación, precipitación interna, escorrentía cortical, ciclaje de nutrientes, servicios ecosistémicos

Descripción:

Resulta importante entender los procesos físicos y químicos que se dan en los agroecosistemas y el papel integral que juegan los árboles en el suministro del agua, ciclaje de nutrientes, y provisión de servicios ecosistémicos. En este estudio, durante 32 semanas se determinó la cantidad y distribución de los eventos de lluvia en la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos dentro de un sistema agroforestal cafetero, donde se registró la lámina (mm) de precipitación (P), la interceptación del dosel (I), la precipitación interna (Pi) y la escorrentía cortical (Ec). Además, en cuatro ocasiones se recolectaron muestras de agua de cada proceso (P, I, Pi y Ec) para la determinación de la concentración de fosfato en laboratorio. Luego, con el objetivo de determinar la relación de concentración y la deposición neta del fosfato, se determinaron los flujos hidroquímicos en cada proceso. Nuestros resultados muestran que la lámina de Pi representa el mayor porcentaje con respecto a P, con un 74,2%, mientras la I y Ec representan un 25,4% y 0,3%, respectivamente. Por otro lado, el flujo de fosfato presentó la mayor entrada en Pi con 90 kg/ha/año, mientras que el menor aporte se dio en la Ec con tan solo 1 kg/ha/año. Estos resultados resaltan la importancia que tiene la estructura del dosel en la hidrología forestal, pues cada flujo hídrico dentro de los agroecosistemas, se comportan de manera diferente en términos físicos y químicos; la información que se genera, termina siendo de gran valor para la comprensión de los servicios ecosistémicos de los cuales se proveen los agricultores y la manera como se relacionan con el cambio climático.

¹ Trabajo de grado

² Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. IPRED. Programa de Ingeniería Forestal. Director: Suescún Carvajal Diego. MSc Bosques y Conservación Ambiental

Abstract

Title: aerial hydrochemical flows in a shaded coffee agroforestry system: phosphate as a limiting nutrient³

Author: Diana Camila Cruz Aguilar, Sara María Fernanda Ramírez Roa⁴

Keywords: precipitation, stemflow, throughfall, nutrient cycling, ecosystem services

Description:

It is important to understand the physical and chemical processes that occur in agroecosystems and the integral role that trees play in water supply, nutrient cycling, and provision of ecosystem services. In this study, during 32 weeks, the amount and distribution of rain events in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes within a coffee agroforestry system was determined, where the sheet (mm) of precipitation (P), the interception of the canopy (I), throughfall (Pi) and stemflow (Ec). In addition, water samples from each process (P, I, Pi and Ec) were collected on four occasions to determine the phosphorus concentration in the laboratory. Then, with the objective of determining the concentration relationship and the net deposition of phosphate, the hydrochemical fluxes were determined in each process. Our results show that the Pi sheet represents the highest percentage with respect to P, with 74.2%, while the I and Ec represent 25.4% and 0.3%, respectively. On the other hand, the phosphate flow presented the highest entry in Pi with 90 kg / ha / year, while the lowest contribution occurred in the Ec with only 1 kg / ha / year. These results highlight the importance of the canopy structure in forest hydrology, since each water flow within agroecosystems behaves differently in physical and chemical terms; The information that is generated ends up being of great value for understanding the ecosystem services that are provided to farmers and how they are related to climate change.

³ Bachelor thesis

⁴ Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia. IPRED. Programa de Ingeniería Forestal. Director: Suescún Carvajal Diego. MSc Bosques y Conservación Ambiental

Introducción

El cambio climático es una realidad que actualmente afronta la humanidad, este hace relación al resultado de las diferentes actividades humanas sobre el régimen climático del sistema Tierra (Man et al., 1999 y Duarte et al., 2006). Desde que el hombre empezó a cambiar sus formas de producción comenzó a generar un cambio radical en la cobertura vegetal natural, dando lugar a la generación de múltiples problemas que, según Bruijnzeel y Sampurno (1990), ocasionan perturbaciones tanto a su entorno como a los diferentes flujos y balance de radiación solar, energía, hídricos y de nutrientes. Ahora bien, resulta importante resaltar el papel integral que juegan los árboles en el suministro de agua, estos también estabilizan y protegen los suelos de la erosión, además de regular el ciclaje de nutrientes. Siendo así, se puede inferir que es fundamental reconsiderar a los sistemas productivos promotores del uso y establecimiento de especies arbóreas, en este caso el café bajo sombra, como los sistemas que ayudan a mitigar de manera positiva al cambio climático (Lin, 2007; Díaz, 2014; Machado et al., 2015; Manrique y Vargas, 2020).

Entidades como la International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) incentivan la investigación forestal, una de sus ramas de estudio es la comprensión de las relaciones entre los bosques, el suelo y el agua, pues reconoce que aún existe mucha incertidumbre en relación con el tema. En lo que concierne a los sistemas agroforestales, se han venido desarrollando diferentes estudios con respecto al vínculo que tiene los árboles y las lluvias, no obstante, Bruijnzeel y Sampurno (1990), exponen que la cantidad de precipitación (P), no se verá alterada por la presencia o no de una capa boscosa, mientras que la presencia de árboles si conlleva a cambios en los diferentes ciclos dentro del sistema. Jaramillo (1999 y 2003) en sus diferentes estudios, muestra como es el movimiento del agua a través del árbol,

siendo interceptada en primera medida por su dosel (I), y luego fluye hacia el suelo vía precipitación interna (Pi) y escorrentía cortical (Ec).

Por otra parte, el movimiento de los nutrientes en la interrelación agua lluvia y dosel, varía según los requerimientos de la planta, el dosel puede enriquecer o empobrecer la concentración de los nutrientes del agua lluvia (Béjar et al., 2018). Generalmente, la concentración de diversos elementos en la Ec es más alta que en la Pi y depende de la concentración química con la que llega la lluvia y del lavado foliar (Arroyave, 2018). Además, como en las cortezas de los árboles se pueden encontrar musgos, líquenes y microflora, la lixiviación de la corteza es un proceso más complejo. Imbach et al. (1989), estudiaron cafetales asociados con dos especies arbóreas distintas, y encontraron que tanto las cantidades de agua interceptada como sus concentraciones de los elementos químicos eran diferentes.

El presente estudio buscó caracterizar y cuantificar los fenómenos hidrológicos en un agroecosistema cafetero, además de estudiar el comportamiento del Fosfato dentro del mismo para comprender los procesos hidroquímicos, lo que genera información básica que permita comprender cómo se distribuye el agua y el intercambio de Fosfato en los sistemas productivos.

Objetivos

Objetivo general

- Evaluar los flujos hidroquímicos aéreos en un sistema agroforestal cafetero bajo sombra.

Objetivos específicos

- Cuantificar los flujos hidrológicos en P, I, Pi y Ec.
- Determinar los flujos hidroquímicos de fosfato en la P, Pi y Ec
- Determinar la relación de concentración y la deposición neta de Fosfato en la Pi y Ec.

Antecedentes

Son múltiples los estudios que se han realizado en cuanto a hidrología y nutrientes en sistemas agroforestales asociados al café, tal es el caso de Giraldo (2003) y Giraldo y Jaramillo (2004) quienes describieron los fenómenos de redistribución de la lluvia y el transporte de nutrimentos en los componentes del ciclo hidrológico en cafetales bajo diferentes densidades de sombrero y concluyen que dichos sistemas de producción son importantes en la regulación de las pérdidas hídricas debido al sombrero y la hojarasca producida por los árboles, Así mismo, exponen que algunos de los nutrientes en los ecosistemas dependen de las especies de sombrero debido a que éstas difieren significativamente en la composición de la biomasa.

Según Klassen et al. (1996), el agua retenida por la parte aérea de la planta está influenciada por la variabilidad de la vegetación, forma e inserción de las hojas, la duración de las lluvias (cantidad de lluvia, pérdida por evaporación de las hojas) y en menor proporción, por la turbulencia atmosférica. La estructura de una plantación perenne puede ser descrita en términos de la capacidad de almacenamiento de agua por el dosel, la cual es definida mediante un coeficiente de almacenamiento del dosel que expresa la cantidad de agua foliar en este sin que ocurra evaporación, y cuando los aportes de lluvia efectiva se han detenido.

Will (1955), mostró por primera vez la importancia relativa del agua lluvia que atraviesa el dosel, al flujo de nutrientes en la hojarasca (Na, K y Mg). Madgwick y Ovington (1959), fueron los primeros en informar que los diferentes tipos de bosques tienen efectos únicos cambiando la concentración de precipitación.

1. Marco referencial

1.1 Marco teórico

1.1.1 Sistema agroforestal

Se ha definido como el arreglo planificado de árboles perennes con una producción integrada, que se da al mismo tiempo con cultivos agrícolas, pastizales o animales de forma secuencial (Fagerholm et al., 2016).

Los sistemas agroforestales se organizan espacial y temporalmente para imitar los procesos naturales de agua y nutrientes, que contribuyen a la mejora de la fertilidad del suelo, protección contra erosión, regulación y purificación del agua, conservación de la biodiversidad y captura de carbono, disminuyendo los requerimientos de insumos artificiales como fertilizantes, herbicidas y plaguicidas, brindando a su vez importantes servicios de regulación (Lorenz y Lal, 2014). Finalmente, los sistemas agroforestales están vinculados a servicios culturales, por ejemplo a prácticas tradicionales, valores estéticos, conocimiento local o turismo (José, 2009; Moreno et al., 2018; Torralba y Col, 2016)

1.1.2 Flujos hídricos

El agua proveniente de la precipitación y que pasa por el dosel de un árbol, cambia en su composición química (Proctor, J. (1989); Parker, 1983), puesto que el material particulado que se encuentra en el ambiente y se deposita en el follaje del árbol, es arrastrado por el agua (Parker, 1983; Potter et al., 1991). Por lo tanto, es de esperar que la mezcla de minerales que constituyen el agua de escorrentía superficial sea diferente a los de la lluvia (Proctor, J. 1989). Pero el aporte de nutrientes por parte de las plantas no solo se da por lavado, la caída del follaje y las ramas también devuelve materia orgánica y minerales al suelo (Kimmins, 1997). La

hojarasca durante el proceso de reciclaje de nutrientes puede aportar hasta el 90% de N y P asimilable por las plantas (Chapin et al., 2002), siendo así, la hojarasca tiene una importante participación en el ciclaje de nutrientes y el intercambio energético entre las plantas y el suelo (Bautista, et al., 2015).

Dentro de los macronutrientes importantes para la vida de las plantas se encuentra el Fosfato (Fernández, 2007), este resulta fundamental en los procesos de división celular, aporta energía a la fotosíntesis y estimula la formación de semillas. El fosfato hace parte de un sistema dinámico complejo del suelo que compromete microorganismos, materia orgánica y otros nutrientes inorgánicos, sin embargo, la fracción de Fosfato que se encuentra disponible para las plantas es muy pequeña (Fernández, 2007). Según Sharman et al. (2013), el Fósforo en el suelo se puede agrupar en dos fracciones: el inorgánico, que es de origen mineral, y el orgánico, que es el que está unido o incorporado con la materia orgánica del suelo. El Fósforo inorgánico proviene de la meteorización de las rocas y el material parental que tiene apatitas (Mackey y Paytan, 2009), sus formas están incorporado con sesquióxidos amorfos y cristalinos, aparte de compuestos calcáreos, y representa el 35-70% del Fósforo total del suelo (Shenet al., 2011).

1.1.3 Precipitación

En meteorología la precipitación hace referencia al depósito de lluvia proveniente de la atmósfera, que incluye la nieve, el granizo, el rocío y la neblina. Según Jaramillo (2005), el agua lluvia se obtiene de la transpiración de las plantas, dando paso a la condensación y formación de las nubes, en donde conforme a la temperatura, las gotas de agua crecen y se precipitan por acción de la gravedad y el peso hasta llegar a la superficie del suelo.

La fuente principal de agua para los ecosistemas es la precipitación, tanto su cantidad anual como su distribución a lo largo del año, determinan los patrones fenológicos y productivos del ecosistema. La humedad atmosférica, aunque de menor magnitud en términos de lo que representa la cantidad de agua que aporta al sistema, desempeña un papel relevante al controlar las tasas y demandas de evapotranspiración por parte de la vegetación (Romero, 2007).

La cantidad de precipitación que llega a la superficie del terreno depende en gran medida del tipo y densidad de la cobertura vegetal. Esta cobertura intercepta parte de la precipitación y la almacena temporalmente sobre la superficie de las hojas y ramas, de donde es devuelta a la atmósfera por evaporación.

1.1.4 Precipitación interna

La parte de la lluvia que cae desde la copa de los árboles y atraviesa el dosel hasta llegar al piso se le denomina precipitación interna (Parker, 1983; Koichiro et al., 2001; Wang et al., 2004). El agua que se deposita sobre la cubierta vegetal se enriquece en cuanto a materia orgánica y elementos minerales como producto de los exudados de las hojas y del fuste del árbol. Además, las partículas atmosféricas retenidas y acumuladas son arrastradas por el agua y finalmente quedan en el suelo, lo que genera condiciones más favorables para las plantas. La cantidad de deposición de nutrientes depende de la arquitectura y estructura del dosel arbóreo (hojas, tallo, flores, ramas), forma del árbol y su estructura química. La magnitud de la retención e incorporación de nutrientes dentro de un ecosistema está estrechamente relacionada con la abundancia de la precipitación (Santa et al., 1989; Andrade et al., 1995; Xu et al., 2001; Xu et al., 2005; Nie et al., 2007; Suescún et al., 2019)

1.1.5 Escorrentía cortical

Consiste en la fracción de precipitación que resbala por el tronco de los árboles, y fluye hacia abajo por el fuste hasta que alcanza el suelo circundante a la base (Iroumé y Huber, 2000). La cantidad de escorrentía cortical están relacionadas de manera directa con la forma del árbol (Murakami, 2009).

1.1.6 Interceptación

El proceso por el cual la precipitación es interceptada por el dosel arbóreo se le denomina interceptación. La lluvia que golpea las superficies del dosel se mantiene temporalmente y, finalmente, se evapora a la atmósfera (David et al., 2005). Factores como la cantidad, duración e intensidad de la lluvia, además de la estructura de la vegetación definen la evaporación y a su vez la interceptación (Dingman, 2002).

1.2 Marco conceptual

Fosfato: Este elemento proviene de las apatitas y depósitos de fosfato natural de donde es liberado a través de procesos de meteorización, lixiviación, erosión y extracción industrial como fertilizante (Rincón & Gutiérrez, 2012)

Servicios ecosistémicos: Bienes y servicios que proveen los bosques los cuales son indispensables para la calidad de vida y la sostenibilidad de los ecosistemas (Balvanera, 2012).

Sistemas agroforestales: Es una forma de cultivo múltiple, donde interactúan especies leñosas y perennes de forma simultánea, en el cual uno de sus componentes es manejado con fines de productividad agrícola (Somarriba, 1998).

Método de ácido ascórbico: Es el procedimiento mediante el cual Molibdato de amonio y tartrato de antimonio y potasio reacciona en medio ácido con ortofosfato para formar un heteropoliácido que se reduce a azul de molibdeno tensamente colorado por ácido ascórbico.

Sistema Agroforestal Cafetero Colombiano: Un sistema agroforestal cafetero es un conjunto de prácticas de manejo del cultivo, donde se combinan especies arbóreas en asocio con el café o en arborización de las fincas, cuyo objetivo el manejo y la conservación del suelo y el agua, y el aumento y mantenimiento de la producción para garantizar la sostenibilidad y el fortalecimiento del desarrollo social y económico de las familias cafeteras.

2. Metodología

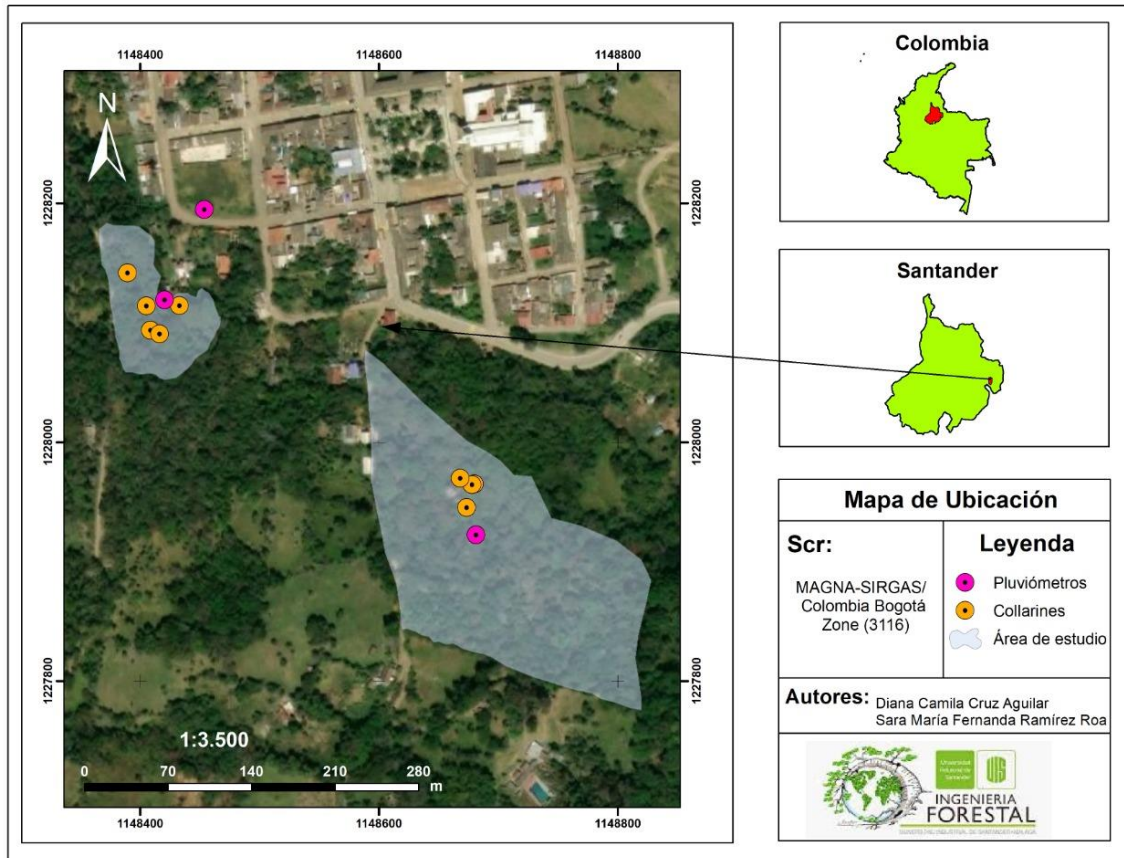
2.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la Cordillera Oriental en los Andes Colombianos, en el municipio de San José de Miranda y dentro de un sistema agroforestal cafetero (Figura 1). Las coordenadas geográficas son 6°39'21,61" latitud Norte y 72°44'0,63" longitud Oeste, a 1980 m s. n. m. la zona de vida es bosque húmedo montano bajo, con temperatura media anual entre 8° y 24°C y una precipitación media anual que oscila entre 1200 y 1400 mm (EOT San José de Miranda, 2003)

La geomorfología del área de estudio está conformada por plegamientos, fallas y la deposición de sedimentos fluviales y lacustres en la parte baja de las montañas, comprendido en su totalidad por rocas sedimentarias, aunque se pueden localizar en un bajo porcentaje rocas metamórficas de medio y alto grado. El suelo presenta una textura arcillosa fina y arcillosa muy fina (EOT San José de Miranda, 2003).

Figura 1

Área de estudio en el municipio de San José de Miranda



2.2 Instalación de collarines y pluviómetros

2.2.1 Escorrentía cortical

Se instalaron nueve collarines para medir la Ec, donde se seleccionaron nueve especies forestales en tres categorías diamétricas diferentes. En la primera categoría conformada por cuatro individuos con DAP entre 10 y 20 cm, cada tronco se equipó con un sistema colector por medio de un canal hecho de plástico de PVC de ½ in con 0,5 m de longitud. Este canal se dispuso en espiral dando una vuelta al tronco y se conectó a un envase con capacidad de 5 gal.

El anillo colector se fijó al árbol con clavos en acero inoxidable de 2,5 in y se selló a la corteza con ayuda de silicona industrial acompañada de grapas inoxidables. El procedimiento anterior se repitió con variación en la longitud de la manguera, en 3 árboles con DAP entre 20 y 30 cm y 6 con DAP >30, donde se empleó un canal de 0,7 y 1,5 m, respectivamente.

2.2.2 Precipitación incidente

Para cuantificar la precipitación se emplearon dos pluviómetros artesanales distribuidos al azar, con un diámetro de 3 in, unido en la parte inferior con un embudo de 11 cm de diámetro, que estuvo equipado con manguera transparente de $\frac{3}{4}$ in con longitud de 0,8 m, que finalmente condujo a un recipiente de 4 L de capacidad. Cada uno de ellos fue cubierto con un colador que impidió el paso de hojas, insectos o cualquier material que impidiera el paso del agua. Para fijar los implementos se utilizaron dos tubos de PVC ($\frac{1}{2}$ in) con 1 m de longitud, cuatro tornillos de 5 cm y tuercas para fijar los pluviómetros a los tubos que se instalaron en un área despejada a 80 cm sobre la superficie del suelo, colindante a la zona de muestreo (García et al., 2018)

2.2.3 Precipitación interna

Se llevó a cabo mediante pluviómetros construidos bajo un procedimiento similar de la medición de precipitación interna. Sin embargo, en este caso se instalaron seis pluviómetros ubicados en dos transeptos bajo el dosel del sistema agroforestal de café.

2.3 Toma de datos

Dentro del sistema agroforestal se monitorearon semanalmente las variables hidrológicas precipitación, P_i y E_c , por un periodo de siete meses (noviembre 2019-junio 2020). Cuatro muestreos de agua combinada por proceso, se tomaron para determinar en laboratorio la concentración de fosfato en forma de ortofosfato PO_4^{3-} . Para evitar la contaminación de las

probetas, estas fueron desinfectadas con ácido clorhídrico, una vez colectadas se refrigeraron y llevaron al laboratorio en el menor tiempo posible.

2.4 Análisis de laboratorio

Todas las muestras se filtraron y llevaron al laboratorio para su respectivo análisis en el menor tiempo posible. La determinación de la concentración de fosfato en mg/L se efectuó mediante espectrofotometría de absorción atómica, por medio del método de ácido ascórbico 4500-E (Baird et al., 2012).

2.5 Análisis de datos

2.5.1 Flujos hidrológicos

Los volúmenes de agua se pasaron a lámina (mm) tanto en P, Pi y Ec, la lámina para Ec se estableció adoptando la metodología propuesta por Stringel et al., (1994); con los anteriores datos se calculó la interceptación según Moreno et al., (1996).

2.5.2 Flujos de fosfato

Se determinó la concentración acumulada de fosfato en mg/L, también para cada proceso, se evaluaron los flujos medios semanales en cuatro muestreos diferentes. Este flujo se obtuvo como el producto entre la concentración y su correspondiente lámina, tanto en P, Pi y Ec.

2.6 Procesos de intercambio químico

El intercambio químico se analizó por medio de la relación de concentración (R_c), calculada como el cociente entre la concentración de fosfato en la Pi o Ec y la concentración fosfato en P (Parker, 1983). Finalmente, la deposición neta (D_n) de fosfato en kg/ha/año, se calculó

mediante la diferencia de la precipitación neta ($P_i + E_c$) y el flujo de fósforo en precipitación (Parker, 1983).

3. Resultados

3.1 Flujos hidrológicos

Para el periodo de estudio de 32 semanas, se registró un total de 582 mm de precipitación(P), el promedio semanal fue de 18,2 mm. El promedio de P_i fue de 13,5 mm representando un 73,90% de P, mientras que el promedio de E_c fue de 0,05 mm representando solo el 0,27% de P. Finalmente, la I presentó una lámina promedio de 4,7 mm representando el 25,80% de P.

En la Tabla 1, se presentan los valores medios semanales durante el tiempo monitoreado.

Tabla 1. Valores medios semanales de flujos hidrológicos

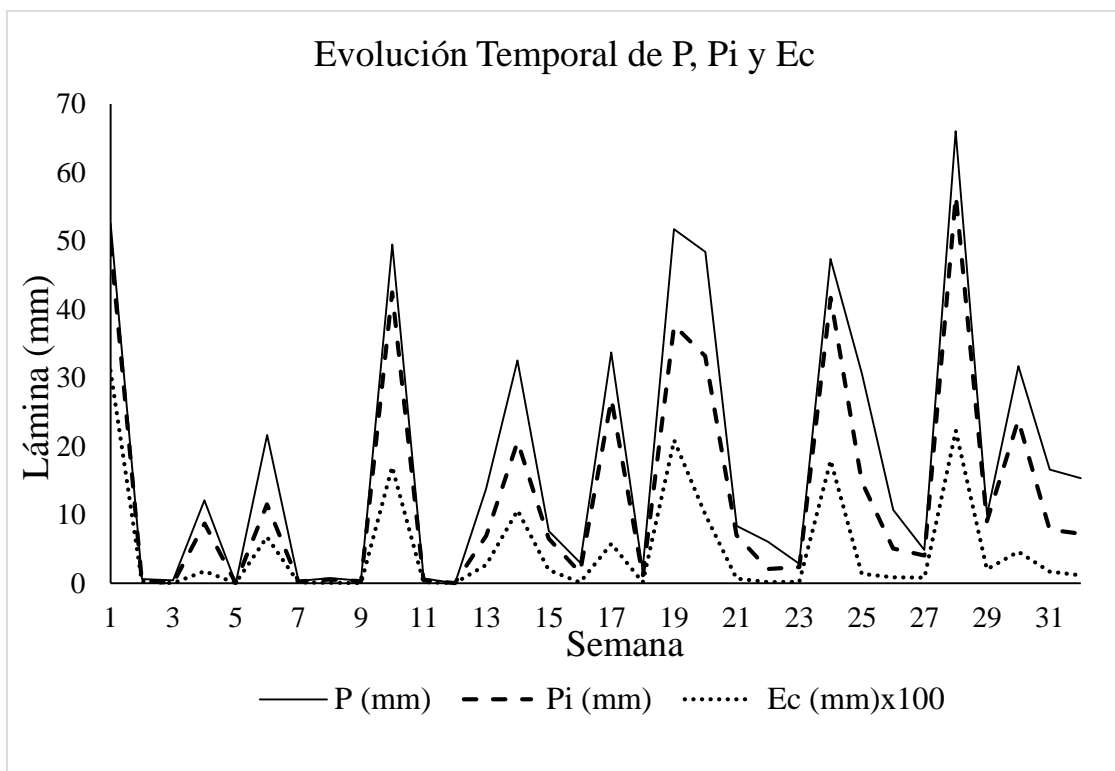
| Variable | Promedio (mm) | % con respecto a P |
|-----------------|----------------------|---------------------------|
| P | 18,2 | 100 |
| P_i | 13,5 | 73,90 |
| E_c | 0,05 | 0,27 |
| I | 4,7 | 25,80 |

En la Figura 2, se presenta la evolución temporal de la lámina de la P, P_i , I y E_c durante el periodo de estudio (25 noviembre 2019 a 29 junio 2020). Se observa que la lámina de la P siempre presentó valores más altos con respecto a las otras variables, la semana en la cual se presentó mayor P fue la semana 28 correspondiente al mes de junio con un acumulado de lluvia de 66,03 mm; mientras que los menores valores se registraron en las semanas 5 y 12 en los

meses de diciembre y febrero, respectivamente, donde no se dieron eventos de lluvia. También se observó que los picos de P coinciden con los de Pi y Ec.

Figura 2

Valores medios semanales de precipitación, precipitación interna y escorrentía cortical



Nota: Donde, P: Precipitación, Pi: Precipitación interna, Ec: Escorrentía cortical, además, los valores de Ec para efectos de la gráfica están multiplicados x100

3.2. Movimiento de fósforo a través del sistema agroforestal.

3.2.1 Valores de concentración

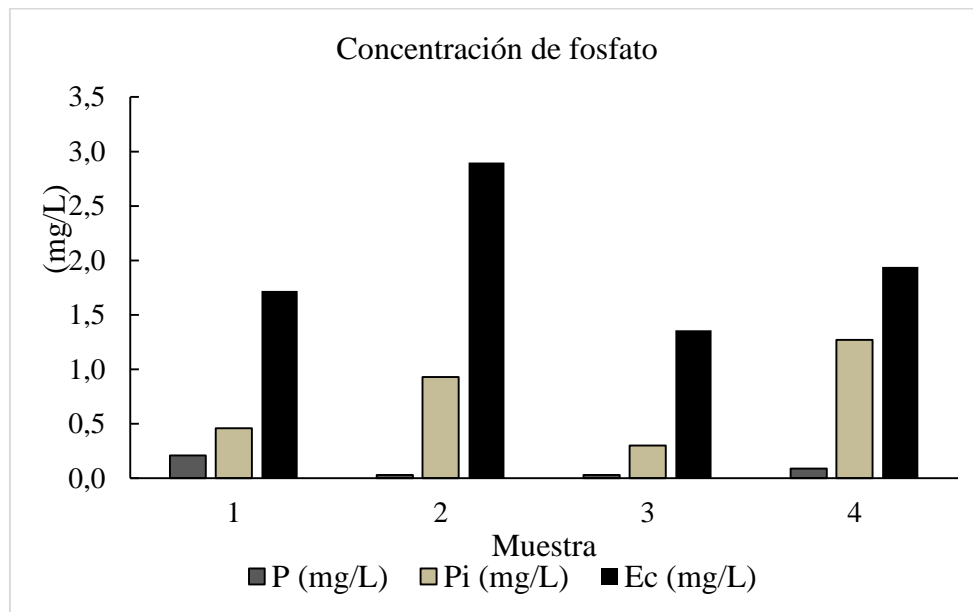
En la Figura 3, se presentan los valores de concentración de fósforo en mg/L para los cuatro muestreos, el promedio de concentración de fósforo fue de 0,09 para P, mientras que el

promedio para la Pi y Ec fue de 0,74 y 1,98, respectivamente. En general, se presentaron mayores concentraciones de fosfato en la Ec con respecto a las otras variables.

Para las cuatro fechas de medición, se encontró un patrón generalizado de aumento de concentración de fosfato tanto para la Pi como para Ec con respecto a la precipitación. En promedio la concentración de fosfato en Pi aumentó 14 veces más que la concentración en P, mientras que la concentración de fosfato en Ec, en promedio, aumentó 43 veces más con respecto a P. Los valores más altos de concentración se registraron en la segunda muestra de la semana del 20 de abril con 2,90 mg/L para la Ec.

Figura 3

Concentración de fosfato



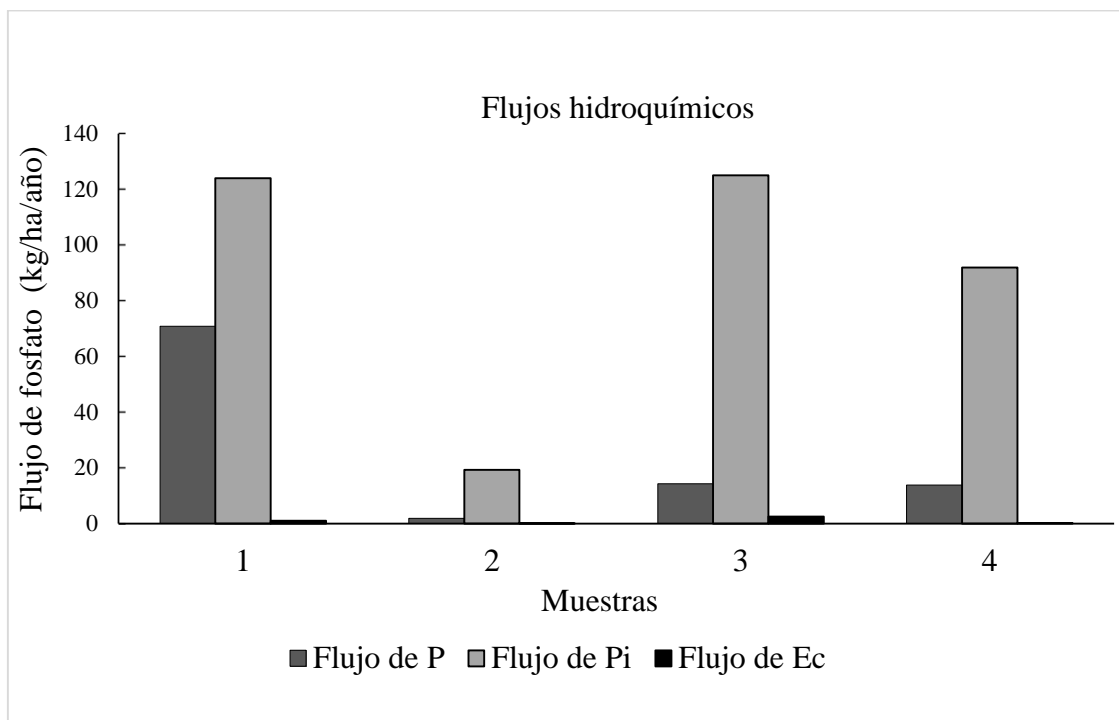
3.2.2 Flujos de fosfato

Los datos obtenidos en la Figura 4 muestran los flujos de fosfato en kg/ha/año. Se encontró que el valor medio del flujo en la Pi fue de 90 kg/ha/año, aumentando considerablemente con

respecto a precipitación y Ec, con valores de 25 y 0,94 kg/ha/año, respectivamente. En el tercer muestreo realizado el 5 de mayo, se encontraron los máximos valores a lo largo del estudio para Pi, con un flujo de 124,95 kg/ha/año. En general, se presentó una tendencia de aumento en los flujos de fosfato de Pi.

Figura 4

Flujos hidroquímicos



3.3 Procesos de intercambio de nutrientes

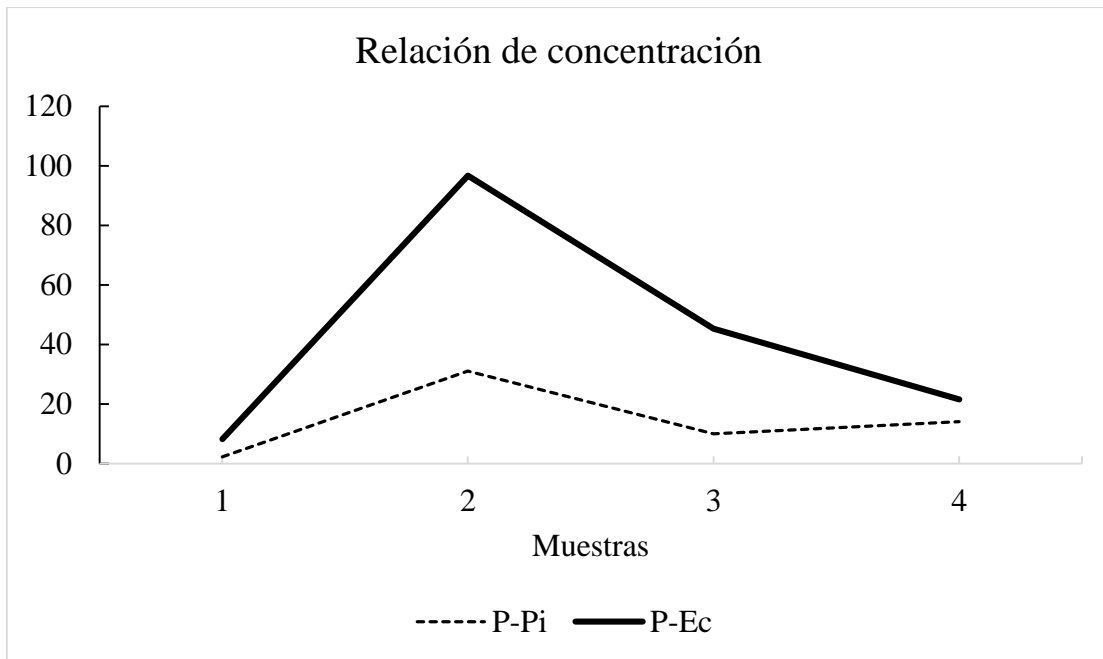
3.3.1 Relación de concentración

La Ec presentó un patrón generalizado de aumento en el sistema agroforestal con respecto a la Pi, donde el mayor dato que se registró se dio en la segunda muestra de Ec con valor de 96,7, mientras que, en la primera muestra en la Pi, se presentó el valor menor con 2,2.

En promedio, la Rc con respecto a la Pi fue de 14,3 mientras el promedio de la Rc en cuanto a la Ec fue de 42,9. Los picos más altos coincidieron en la segunda muestra y las dos variables exponen un comportamiento similar. Se observó que, en general la media en Ec fue tres veces mayor en comparación con Pi. En la Figura 5 se muestra el comportamiento en la Rc en el sistema agroforestal cafetero.

Figura 5

Relación de concentración



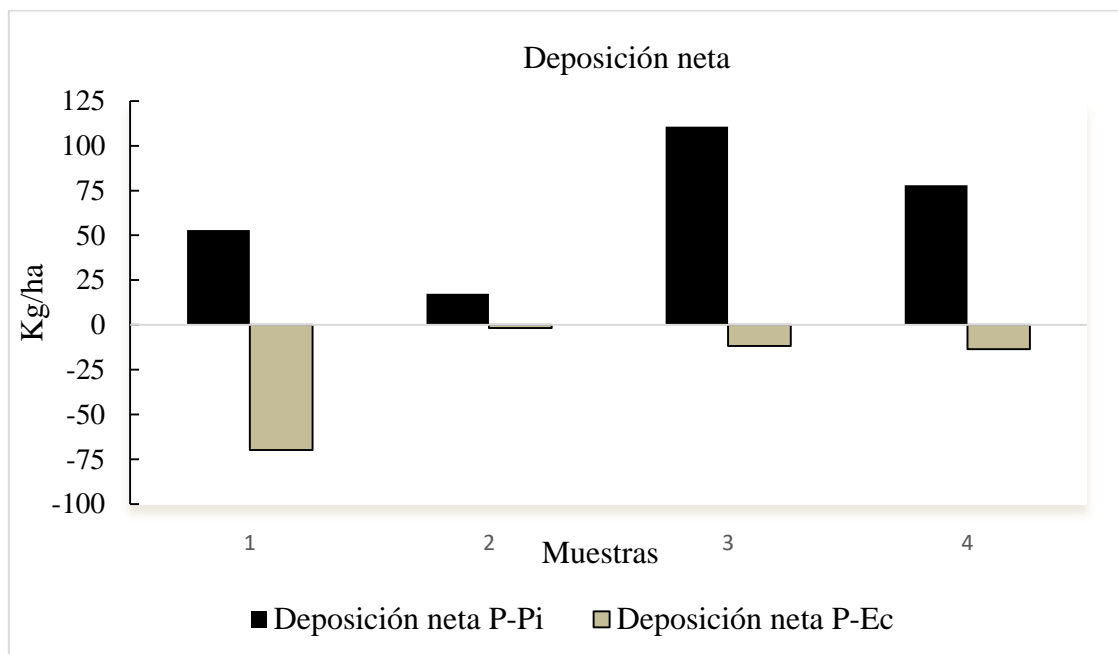
3.3.2 Deposición neta

La Dn para Pi presentó valores positivos, lo que indica una ganancia de fósforo por parte del agua que fluye en Pi. Por el contrario, los resultados señalan valores negativos de Dn para la Ec (indicando captura de fósforo en Ec). En general, el fósforo fue retenido por el dosel, por lo que se generó un empobrecimiento.

El valor medio de Dn para Pi fue de 64,8 kg/ha, el mayor incremento se dio en la tercera muestra (110,8 kg/ha), mientras que el menor dato obtenido fue en la muestra dos con registro de 17,4 kg/ha. Por su parte, en la Ec se obtuvo un promedio de -24,2 kg/ha, con el mayor valor en el segundo muestreo (-1,8 kg/ha), mientras que el menor valor fue de -69,8 kg/ha (Figura 6)

Figura 6

Deposición neta



4. Discusión

La hidrología forestal juega un papel fundamental para entender la dinámica de un ecosistema, por ello resulta importante describir el flujo de la precipitación y de nutrientes dentro de ellos, estos procesos se ven directamente influenciados por la estructura del dosel del bosque (Wan y Chen, 1999; Xiao et al., 2002).

Los resultados obtenidos en nuestro estudio indican que la mayor cantidad de precipitación en los sistemas agroforestales se convierte en P_i , resultado que concuerda con otros estudios como Giraldo y Jaramillo (2004), quienes reportan entre un 70 y 85% de precipitación que corresponde a precipitación interna. En esta investigación la parte restante correspondiente a la interceptación con un 25,8% de la lluvia, esto se debe a la captación de la lluvia por la cubierta forestal o árboles de sombrero y al agua retenida por las plantas de café. En cuanto a los flujos en la escorrentía cortical se obtuvo un valor promedio de 0,05% con respecto a la precipitación, valores inferiores a los registrados por Suescún et al. (2018).

La E_c es un proceso de gran relevancia para el ciclo de nutrientes, ya que este representa una ruta de entrada de solutos en el suelo alrededor los árboles (Hofhansl et al., 2012). Para nuestros resultados, en general la concentración de fósforo aumentó tanto en escorrentía cortical como en precipitación interna, lo que significa una mayor movilidad de este elemento desde las copas hasta el tronco del árbol, resultados que concuerdan con los hallados por (Cavalier y Jaramillo, 2016; Suescún et al., 2018).

Se observa que cuando el agua atraviesa el sistema agroforestal de café, se presenta un aumento en la concentración del fósforo, se incrementa más de tres veces con relación a la precipitación, así como su flujo, esto debido a alta movilidad de este nutriente. La precipitación

interna junto con la escorrentía cortical son los responsables de la llegada al suelo de los nutrientes depositados en la copa o excretados por las hojas. Estos enriquecimientos en el flujo de agua pueden significar una pérdida de los nutrientes para el follaje, pero un ingreso a la zona de raíces, donde puede ser aprovechado en los procesos de nutrición del cultivo. Usualmente, cuando la lluvia pasa a través de la cubierta arbórea, su concentración en nutrientes minerales aumenta (Kozlowski y Pallardy, 1997).

Existe una relación con el lavado de elementos y la absorción directa de los iones presentes en la precipitación (Romero, 2007; Yáñez et al., 2014). El flujo neto incluye el flujo de fuentes externas, debido al lavado de materiales de deposición seca, y el flujo de fuentes internas, debido al lavado e intercambio de la cubierta (Shibata y Sakuma, 1996). Los flujos netos de iones proporcionan una primera aproximación a la transferencia de elementos a través de la vegetación, reflejando la contribución de iones por la deposición seca y el lavado interno de la cubierta, o la pérdida de iones a través de la absorción por la cubierta. Sin embargo, cierta cantidad de agua permanece inevitablemente en la cubierta después de cada lluvia, la cual es evaporada dejando los iones asociados (Neary y Gizyn, 1994).

Según Suescún et al., (2018) el flujo de nutrientes de precipitación interna y escorrentía cortical está directamente relacionado con la precipitación, lo que implica una mayor lixiviación o lavado foliar en las estaciones lluviosas. esto puede alterar su capacidad para proporcionar servicios clave a la sociedad. La degradación y la posible pérdida de estos ecosistemas, puede tener importantes consecuencias económicas para la sociedad como pérdida de los servicios ecosistémicos (Martínez et al., 2009)

Finalmente, es esencial entender que el agua es fundamental para el desarrollo de la vida, por tanto, los diferentes sistemas de la Tierra se ven afectados por los cambios (así sean

menores) en la cantidad y la composición del agua que llegue al mismo (Duarte et al., 2006). por tanto, la adopción de sistemas agroforestales de café es una estrategia prometedora para mitigar el impacto negativo del cambio climático (Gómez et al., 2020)

3. Conclusiones

En conclusión, nuestros resultados muestran las diferencias existentes en cada uno de los flujos de precipitación que interactúan con la cubierta boscosa, siendo la Pi quien generó un aporte mayor comparado con Ec. Además, se evidenció el cambio y la disponibilidad del fosfato a lo largo del sistema, siendo Ec quien presentó mayores concentraciones, pero contrario a esto, en el sistema fue Pi quien obtuvo datos superiores en los flujos de fosfato. Por otro lado, en los datos obtenidos en la deposición neta, se evidenció el cambio en la disponibilidad del fosfato, mientras en la Pi se dio un enriquecimiento, la Ec mostró un empobrecimiento, evidenciando la influencia del dosel, ramas y fuste del árbol en la química del agua. Finalmente, el paso de agua por el dosel aporta al sistema agroforestal fosfato en Pi mientras que la Ec lo absorbe.

Recomendaciones

Se recomienda que, en próximos estudios se consideren otros factores como la hojarasca, la escorrentía e infiltración en el suelo del ecosistema, además de otros nutrientes importantes para este tipo de agroecosistemas.

Hacer el muestreo en una escala mayor de tiempo, para así poder conocer la evolución temporal de la lluvia en el mismo, importante estudiar la variabilidad de los flujos hidrológicos e hidroquímicos entre las especies forestales.

Referencias bibliográficas

- Arroyave, M. A. (2012) *Dinámica del agua y los nutrientes solubles en agrosistemas cafeteros* (tesis de maestría). Universidad Nacional De Colombia Facultad De Ciencias Agrarias Departamento De Ciencias Forestales. Medellín, Colombia.
- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*. Recuperado de <https://www.revistaecosistemas.net/>
- Béjar, S. J., Cantú, I., Domínguez, T. G., González, H., Marmolejo, J. G., Yáñez, M. I., y Luna Robles, E. O. (2018). Redistribución de la precipitación y aporte de nutrimentos en *Pinus cooperi* CE Blanco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(50), 94-120.
- Bruijnzeel, LA, y Sampurno, SP (1990). Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review (undergraduate thesis). Free University, Amsterdam, The Netherlands.
- Cavelier, J., Jaramillo, M., Solis, D., y de León, D. (1997). Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. *Journal of Hydrology*, 193(1-4), 83-96.
- David, J., Valente, F., y Gash, J. (2006). Evaporación de la lluvia interceptada. Enciclopedia de Ciencias Hidrológicas [versión electrónica]. (eds MG Anderson y JJ McDonnell). doi: [10.1002 / 0470848944.hsa046](https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa046)
- De las Salas, G. (1987). *Suelos y ecosistemas forestales: con énfasis en América Tropical*. San José, Costa Rica: Servicio Editorial del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Díaz, M. A. (2014). *Estudio de la variabilidad climática y los agroecosistemas cafeteros desde la dinámica de sistemas*. (tesis magistral). Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Económicas Instituto de Estudios Ambientales Bogotá D.C., Colombia.
- Dingman, S. (2002). *Physical Hydrology*. Upper Saddle River, United States: Prentice Hall.

- Duarte, C. M., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo Buendía, M., ... y Valladares, F. (2006). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Madrid, España: Cyan, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A.
- Fagerholm, N., Torralba, M., Burgess, P., y Plieninger, T. (2016). A systematicap of ecosystem services assessments around European agroforestry. *Ecological Indicators*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/>
- Giraldo J. F. (2003). *Aspectos hidrológicos y de nutrimentos en cafetales bajo diferentes densidades de sombrío de guamo /Inga edulis/ Mart*. (Tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
- Giraldo, J. F., y Jaramillo, A. (2004). Ciclo hidrológico y transporte de nutrimentos en cafetales bajo diferentes densidades de sombrío de guamo. *Digital repository of the National Coffee Research Center*. Recuperado de: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/233>
- García-Leoz, V., Villegas, J. C., Suescún, D., Flórez, C. P., Merino-Martín, L., Betancur, T., y León, J. 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.
- Godoy, R. O. B. E. R. T. O., Oyarzún, C., y Bahamondes, J. (1999). Flujos hidroquímicos en un bosque de *Nothofagus pumilio* en el Parque Nacional Puyehue, sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 72(4) 579-594.
- Gomes, L. C., Bianchi, F. J. J. A., Cardoso, I. M., Fernandes, R. B. A., Fernandes Filho, E. I., y Schulte, R. P. O. (2020). Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858>.
- Hofhansl, F., Wanek, W., Drage, S., Huber, W., Weissenhofer, A., y Richter, A. (2012). Controls of hydrochemical fluxes via stemflow in tropical lowland rainforests: Effects of meteorology and vegetation characteristics. *Journal of Hydrology*. (452), 247–258.

- Imbach, A. C., Fassbender, H. W., Beer, J., Borel, R., y Bonnemann, A. (1989). Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poro (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica, 6: balances hídricos e ingreso con lluvias y lixiviación de elementos nutritivos. *Turrialba (IICA)*. 39 (3), 400-414.
- Jaramillo, A., y Cháves, B. (1999). Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé*, 50(2), 97-105.
- Jaramillo, A. (2003). La lluvia y el transporte de nutrimentos dentro de ecosistemas de bosque y cafetales. *Digital repository of the National Coffee Research Center*. Recuperado de: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/249>
- Jose S (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry systems*, 76(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Klaassen, W., Lankreijer, H. J., y Veen, A. W. (1996). Rainfall interception near a forest edge. *Journal of Hydrology*, 185(1-4), 349-361.
- Kozlowski, T. T., y Pallardy, S. G. (1996). *Physiology of woody plants*. New York, Estados Unidos: Academic Press.
- Lin, BB (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1-2), 85-94.
- Lorenz, K., y Lal, R. (2014). Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 34(2), 443–454.
- Machado, M. M., Nicholls, C. I., Márquez, S. M., y Turbay, S. (2015). Caracterización de nueve agroecosistemas de café de la cuenca del río Porce, Colombia, con un enfoque agroecológico. *Idesia (Arica)*, 33(1), 69-83.
- Manrique, M. A. D., y Vargas, C. A. C. (2020). Estudio de la estructura del agroecosistema cafetero mediante el diagrama de ciclos causales. Estudio de caso (Cundinamarca, Colombia). *Revista de estudios sobre despoblación y desarrollo*. (28), 135-160.

- Madgwick, H. A. I., y Ovington, J. D. (1959). La composición química de la precipitación en bosques adyacentes y parcelas abiertas. *Silvicultura: Revista internacional de investigación forestal*. 32 (1), 14-22.
- Moreno, G., Aviron, S., Berg, S., Crous-Duran, J., Franca, A., de Jalón, S. G., ... y Paulo, J. A. (2018). Agroforestry systems of high nature and cultural value in Europe: provision of commercial goods and other ecosystem services. *Agroforestry systems*, 92 (4), 877-891.
- Moreno, G., Gallardo, JF., Ingelmo, F., Cuadrado, S., y Hernández, J. (1996). Balance hídrico del suelo en cuatro bosques de *Quercus pyrenaica* a través de un gradiente de lluvia. *Investigación y gestión de tierras áridas*. 10 (1), 65-84.
- Murakami, S. (2009). Abrupt changes in annual stemflow with growth in a young stand of Japanese cypress. *Hydrological Research Letters*. (3), 32-35.
- Neary, A. J., y Gizyn, W. I. (1994). Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario. *Canadian Journal of Forest Researc*. 24 (6), 1089-1100.
- Parker, G. G. (1983). Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in ecological research*. (13). 57-133.
- Proctor, J. (Ed.). (1989). *Mineral nutrients in tropical forests and savanna ecosystems*. Boston, Estados Unidos: Editorial Oxford, Blackwell Scientific Publ., GB.
- Rincón, L. E. C., y Gutiérrez, F. A. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fosfato en suelos. *Revista colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.
- Romero, L. (2007). *Estudio de los flujos hídricos en las Dunas de Guardamar Del Segura* (Tesis Doctoral). Universidad de Alicante. Guardamar del Segura, España.
- Shibata, H. y Sakuma, T. (1996). Modificación del dosel de la química de la precipitación en bosques caducifolios y coníferos afectados por deposición ácida. *Ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 42 (1), 1-10.
- Somarrriba E. 1998. Diagnóstico y Diseño Agroforestal. *Agroforestería en las Américas*. 5(17-18), 68-72.

- Somarriba, E., Carreño-Rocabado, G., Amores, F., Caicedo, W., de Pélichy, S. O. G., Cerda, R., y Ordóñez, J. C. (2017). Trees on farms for livelihoods, conservation of biodiversity and carbon storage: evidence from Nicaragua on this “invisible” resource. *Integrating landscapes: agroforestry for biodiversity conservation and food sovereignty*. (12), 369–393. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69371-2_15
- Suescún, D., León, J. D., Villegas, J. C., García-Leoz, V., Correa-Londoño, G. A., y Flórez, C. P. (2019). ENSO and rainfall seasonality affect nutrient exchange in tropical mountain forests. *Ecohydrology*, 12(2), e2056.
- Tobón, C. (1999) Monitoring and modelling hydrological fluxes in support of nutrient cycling studies in Amazonian Rain Forest Ecosystem. *Wageningen: The Tropenbos Foundation*, 169 p.
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, PJ, Moreno, G. y Plieninger, T. (2016). ¿Los sistemas agroforestales europeos mejoran la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas? Un metaanálisis. *Agricultura, ecosistemas y medio ambiente*. (230), 150-161.
- Wan, S. Q. y L. Z. Chen. (1999). Canopy distribution of precipitation in warm temperate deciduous broad-leaved forests. *Acta Phytoecologica SINICA* 23(6) 557-561.
- Qiang, W. S., & Zhi, C. L. (1999). Canopy distribution of precipitation in warm temperate deciduous broad-leaved forests. *Acta Phytoecologica SINICA*, (6).
- Xiao, Y., L. Dai, D. Niu, F. Tong, G. Chen y H. Deng. (2002). Influence of canopy on precipitation and its nutrient elements in broad-leaved/Korean pine forest on the northern slope of Changbai Mountain. *Journal of Forestry Research* 13(3), 201-204.
- Xu, Y., G. Zhou, Z. Wu, T. Luo and Z. He. (2001). Chemical composition of precipitation, throughfall and soil solutions at two forested sites in Guangzhou, South China. *Water, Air, and Soil Pollution*. 130 (1-4),1079–1084.
- Yáñez, M. I., Cantú I., González H., y Uvalle J. I. (2014). Redistribución de la precipitación

en tres especies arbustivas nativas y una plantación de eucalipto del noreste de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 5(2), 71-84.

Apéndice

Apéndice A. Elaboración de pluviómetros artesanales



Apéndice B. Preparación de los tubos para los pluviómetros



Apéndice C. Limpieza de la corteza para instalación de collarines



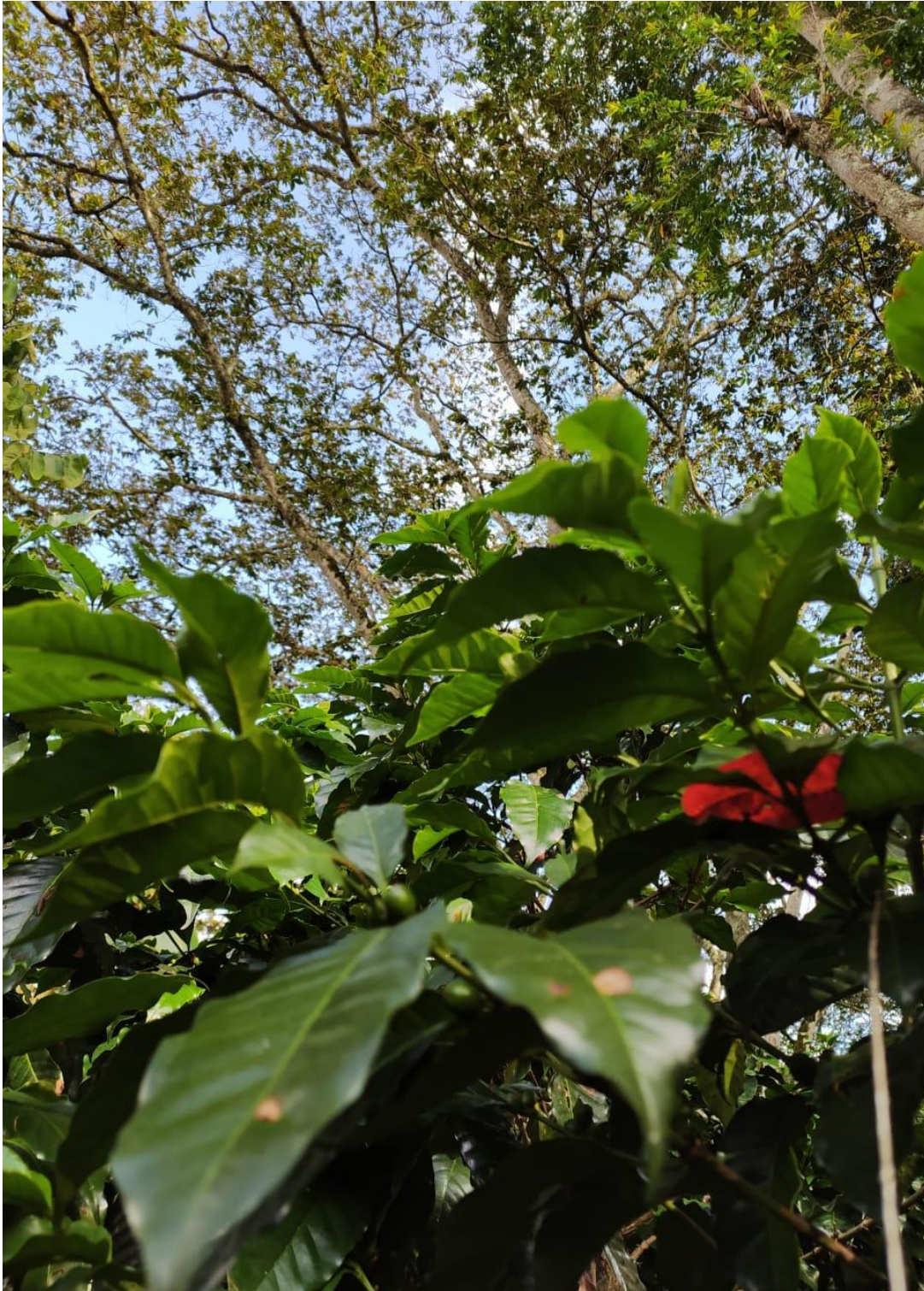
Apéndice D. Pluviómetros debajo del dosel para medir la precipitación interna



Apéndice E. Pegado de mangueras alrededor de la corteza



Apéndice F. Sistema agroforestal cafetero



Apéndice G. Fijación de collarines a la corteza de los árboles.

