



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Influencia de rasgos funcionales en la deposición de ortofosfatos en paisajes interandinos modificados en Colombia

### Influence of Functional Traits on Orthophosphate Deposition in Modified Inter-Andean Landscapes in Colombia

Santiago Vásquez-Sogamoso<sup>1</sup> , Kelly Leani Quintero<sup>1</sup> , Joan Amir Arroyave-Rojas<sup>1</sup> ,  
Hernan Darío Cañola<sup>1</sup> 

Vásquez-Sogamoso, S., Quintero, K. L., Arroyave-Rojas, J. A., & Cañola, H. D. (2023). Influencia de rasgos funcionales en la deposición de ortofosfatos en paisajes interandinos modificados en Colombia. *Colombia Forestal*, 26(2), 29-43.

**Recepción:** 12 de octubre 2022

**Aprobación:** 10 de abril 2023

#### Resumen

Los ecosistemas tropicales tienen altas limitaciones en la disponibilidad natural de fósforo en el suelo, condición que se intensifica con su pérdida y fragmentación. En paisajes modificados, la relación entre árboles aislados y la precipitación puede representar una entrada de  $\text{PO}_4\text{-P}$  al suelo. Este estudio realiza mediciones sobre 16 individuos de 4 especies de árboles aislados: *Cariniana pyriformis*, *Cedrela odorata*, *Luehea seemannii* y *Nectandra reticulata*. Se evaluaron 9 rasgos funcionales en cada individuo y las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en los flujos de partición de la precipitación. Se encontró una mayor deposición de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en individuos de *N. reticulata* y *L. seemannii*, que presentaron una configuración específica de rasgos funcionales, *i.e.*, una mayor área foliar, una mayor cobertura de epífitas y un mayor porcentaje en densidad de copa. Estos resultados resaltan el papel de estos rasgos funcionales en el mejoramiento de las condiciones biogeoquímicas del suelo en paisajes modificados.


**Palabras clave:** árboles aislados, interceptación, limitación de nutrientes, precipitación.

#### Abstract

Tropical ecosystems have high limitations regarding the natural availability of soil phosphorus, a condition that intensifies with their loss and fragmentation. In modified landscapes, the relationship between isolated trees and precipitation may represent an input of  $\text{PO}_4\text{-P}$  into the soil. This study measured 16 individuals of four isolated tree species: *Cariniana pyriformis*, *Cedrela odorata*, *Luehea seemannii*, and *Nectandra reticulata*. Nine functional traits of each individual and the concentrations of  $\text{PO}_4\text{-P}$  in the precipitation partition flows were evaluated. The highest concentrations of soil  $\text{PO}_4\text{-P}$  were found in individuals of *N. reticulata* and *L. seemannii*, which exhibited a specific configuration of functional traits, *i.e.*, a higher leaf area, a higher epiphyte cover, and a higher percentage of canopy density. These results highlight the role of these functional traits in improving soil biogeochemical conditions in modified landscapes.

**Keywords:** isolated trees, interception, nutrient limitation, precipitation.

<sup>1</sup> Grupo Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín, Colombia.

 Autor de correspondencia

## INTRODUCCIÓN

El fósforo tiene un rol determinante en los ecosistemas naturales, al ser un elemento esencial para todos los organismos vivos, con implicaciones en procesos bioquímicos clave como la fotosíntesis y la obtención de energía celular, lo que lo convierte en un elemento fundamental para mantener la estructura y composición de los ecosistemas (Vitousek *et al.*, 2010). La baja disponibilidad natural de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en los suelos de ecosistemas tropicales y su baja movilidad constituyen una gran limitación, que afecta la productividad de las plantas y la cantidad de carbono (C) secuestrado en ecosistemas tropicales (Fleischer *et al.*, 2019; Ellsworth *et al.*, 2022).

La deposición atmosférica contribuye al suministro de fósforo en suelos altamente meteorizados y con limitaciones naturales como los ecosistemas tropicales (Hou *et al.*, 2020), donde las relaciones entre la vegetación y la precipitación están determinadas por las características estructurales y morfológicas del dosel, así como por las condiciones hidrometeorológicas de cada evento de lluvia que determinan la entrada de agua y nutrientes al suelo (Dantas de Paula *et al.*, 2021; Yue *et al.*, 2021). En ecosistemas boscosos, se ha demostrado que la interacción entre el dosel y la lluvia da como resultado la reducción y redistribución de la precipitación (P) en la superficie, afectando la biota del suelo y los procesos ecohidrológicos a escala de paisaje (Sadeghi *et al.*, 2018).

Cuando la precipitación entra en contacto con el dosel, la partición y redistribución de la lluvia en las estructuras de la vegetación desencadena variaciones en la heterogeneidad espacial del agua y la circulación de nutrientes que llegan al suelo (Luna-Robles *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2019). En los bosques, en comparación con otros ecosistemas, la precipitación interna ( $P_i$ ) representa la mayor parte de la lluvia que llega a la superficie (Kumar Gautam *et al.*, 2017), mientras que la escorrentía cortical ( $E_c$ ) en los árboles rara vez supera el 2 % de la precipitación total (Yue *et al.*, 2021).

Sin embargo, la  $E_c$  contribuye significativamente al flujo de nutrientes que llegan a la zona radicular (Van Stan & Allen, 2020; Oka *et al.*, 2021). La variabilidad temporal y espacial de la circulación de agua y nutrientes puede diferir entre especies y en la transición de los ecosistemas (Luna-Robles *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2019; Yue *et al.*, 2021). Esta condición está influenciada por los rasgos funcionales de las plantas, que pueden determinar la temporalidad y composición química del agua que llega al suelo (Magliano *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2019).

Los rasgos funcionales tienen implicaciones importantes en funciones del ecosistema como la regulación hidrológica y biogeoquímica a escala de paisaje (Oliva Carrasco *et al.*, 2015; Dantas de Paula *et al.*, 2021). Se ha demostrado que una combinación particular de rasgos funcionales puede ser determinante en el restablecimiento de funciones hidrológicas en procesos de restauración forestal en ecosistemas Andinos tropicales, donde los rasgos que describen la copa (como el área de la copa, la densidad de la copa, el índice de ramificación, el área de la hoja y la densidad por volumen de la copa) explican la variabilidad temporal de los flujos de agua que llegan al suelo (Cano-Arboleda *et al.*, 2022). Además, otros estudios han relacionado los rasgos foliares, como el área y la densidad de tricomas, con la capacidad de influir en procesos hidrológicos y en la circulación y deposición de nutrientes al suelo en ecosistemas boscosos (Sohrt *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2020). Sin embargo, no existen estudios que evalúen la circulación de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en árboles aislados de bosques húmedos interandinos modificados, y menos aún su relación con rasgos funcionales que puedan influir en la deposición y circulación de nutrientes limitantes como el  $\text{PO}_4\text{-P}$ .

El objetivo de esta investigación fue evaluar cómo los rasgos funcionales de árboles aislados nativos de paisajes modificados de la cuenca media del Magdalena colombiano y las características hidrometeorológicas de diferentes eventos de precipitación influyen en el flujo superficial de agua y las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  que llegan al suelo.

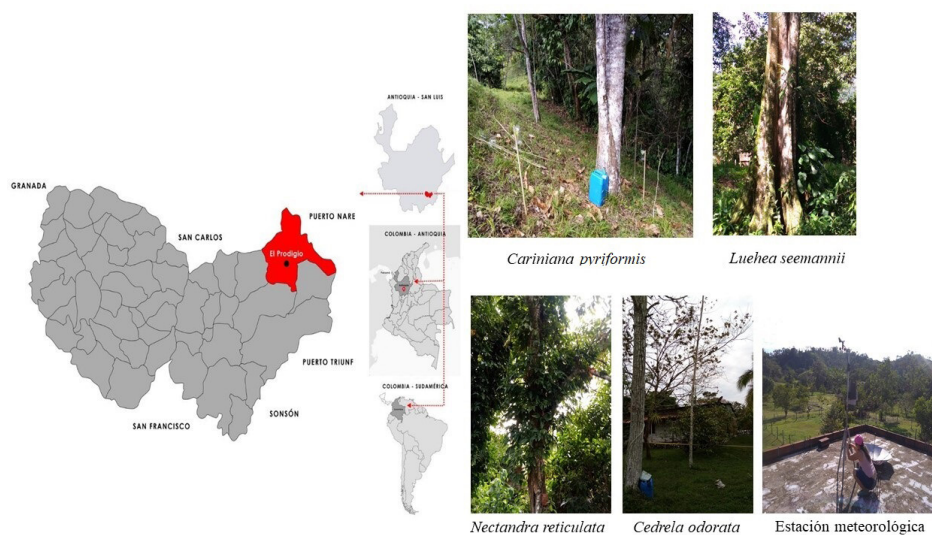
Este estudio evaluó los flujos de partición de la precipitación en 16 individuos de 4 especies de árboles aislados nativos que se encuentran comúnmente en paisajes modificados del bosque húmedo tropical colombiano. Se midieron 9 rasgos funcionales y las características hidrometeorológicas en 16 eventos individuales de precipitación. Se discute cómo los rasgos y las condiciones hidrometeorológicas de cada evento de precipitación pueden influir en los flujos hidrológicos y las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  que llegan a la superficie.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio de estudio se encuentra ubicado en el corregimiento del Prodigio, en el municipio de San Luis, Antioquia, en la cuenca media del río Magdalena Colombiano ( $6^{\circ}02'32''\text{N}$   $74^{\circ}83'36''\text{O}$ ), valle interandino, a una altura de 430 m s.n.m. La precipitación media anual en la región es de 4.557 mm, con una temperatura media anual de  $26^{\circ}\text{C}$  y un comportamiento bimodal (dos épocas húmedas y dos secas al año) asociado a la dinámica de la Zona de Convergencia Intertropical

(ZCIT) (Duque-Gardeazábal *et al.*, 2018). La zona corresponde a la zona de vida de Holdridge Bajo Húmedo (Figura 1). En esta región, el paisaje está compuesto por un mosaico de diferentes usos del suelo, generalmente dominados por pastizales para la cría de ganado, alternados con áreas para la producción agrícola y la minería, así como con parches de vegetación nativa y árboles aislados (Rodríguez Torres, 2021).

Este estudio evalúa los flujos de partición de la precipitación y las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  que llegan al suelo en la precipitación incidente (P), escorrentía cortical (Ec) y precipitación interna (Pi) de 16 eventos de precipitación individuales entre abril de 2021 y agosto de 2021. Se seleccionaron 16 individuos de 4 especies de árboles aislados: *Cariniana pyriformis* Miers, *Cedrela odorata* Linnaeus, *Luehea seemannii* Triana & Planch y *Nectandra reticulata* Ruiz & Pav. Estos individuos cumplen con los criterios de árboles nativos, maduros, aislados y ubicados en la misma área geográfica. Los sitios de monitoreo se ubicaron a menos de 1 km entre sí y corresponden a paisajes modificados del bosque húmedo tropical de la cuenca media del Magdalena colombiano (Figura 1).



**Figura 1.** Localización del sitio de estudio y especies nativas aisladas, i.e., *Cariniana pyriformis*, *Cedrela odorata*, *Luehea seemannii*, *Nectandra reticulata*, en paisajes modificados de la cuenca del Magdalena Medio colombiano

## Protocolo de medición de rasgos funcionales

Se midieron 9 rasgos funcionales en cada uno de los individuos arbóreos, siguiendo protocolos estandarizados (Salgado-Negret, 2016). Estos rasgos funcionales se seleccionaron por su relación con el flujo y la interceptación de agua y nutrientes (Yue *et al.*, 2021; Cano-Arboleda *et al.*, 2022). Cada rasgo fue evaluado de la siguiente manera:

1. *Altura de la copa* (AC): Distancia tomada desde la base de la copa hasta su parte terminal.
2. *Área de la copa* (Área C): Promedio de los diámetros de la copa, tomados en sentidos Norte-Sur y Este-Oeste.
3. *Densidad de la copa* (D\_C): Se tomaron fotografías debajo de la copa de cada individuo en los cuatro puntos cardinales, a 1.30 m de altura. Posteriormente, las imágenes fueron procesadas en el programa Image J, en el cual se convirtieron a imagen binaria, y se midió el porcentaje de área en color negro (follaje).
4. *Índice de ramificación* (IR): Se seleccionaron 3 ramas principales por individuo, y se midió el número de ramificaciones por metro de rama, sin considerar las ramas muertas.
5. *Densidad x volumen* (DxV): Producto entre la densidad y el volumen de la copa. El volumen se calculó asumiendo que la copa del árbol se asemeja a una forma cilíndrica.
6. *Cobertura de epífitas en el tronco* (CE): Se tomaron cuatro fotografías de frente al tronco en dirección a los 4 puntos cardinales, a 1.30 m de altura en un área de 30 x 60 cm del tronco principal en cada individuo. El porcentaje de epífitas se estimó mediante el *software* ARLIQ en cada una de las fotografías, y se determinó el promedio por individuo.
7. *Ángulo de la rama principal* (ARP): Se tomaron fotografías a 1 m de distancia de cada

árbol, frente a la rama principal. El ángulo se determinó en las fotos con el *software* Angulus.

8. *Diámetro* (DAP): Los diámetros de todos los individuos se midieron con una cinta métrica a 1.30 m de altura de la base de cada individuo.
9. *Área foliar* (AF): Se realizó un monitoreo aleatorio tomando 10 hojas de sol en cada individuo, las cuales se escanearon con un escáner Epson L3210. Con el programa Image J, se determinó el área de la lámina foliar proyectada por cada muestra. El valor promedio de las hojas en cada individuo se determinó como el área foliar.

## Monitoreo hidrometeorológico

Las características hidrológicas de cada evento de precipitación (intensidad, duración y días secos antes de cada evento), así como las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento), se registraron mediante una estación meteorológica Davis Vantage Pro2, con una frecuencia de muestreo de 10 minutos, ubicada a menos de 1 km de todos los sitios de monitoreo. Además, se instalaron 2 pluviómetros a campo abierto para determinar P y, en cada individuo, se recolectó la Pi mediante 2 pluviómetros ubicados aleatoriamente debajo de la copa de los árboles. Los volúmenes de agua recolectados se convirtieron a lámina de agua (mm), dividiéndolos por el área de captación de los pluviómetros. La Ec se midió con canaletas de caucho helicoidales instaladas en cada árbol, garantizando la cobertura total de su diámetro, que se unió a un tanque de 40 L. Para las mediciones de Ec, el volumen de agua recolectada en los collares se convirtió a unidades de lámina de agua (mm), dividiendo por el área basal de cada árbol. La precipitación neta (Pn) y la interceptación (I) se calcularon de la siguiente manera:  $Pn = Pi + Ec$  y  $I = P - Pn$ .



## Monitoreo de las concentraciones y flujos de $\text{PO}_4\text{-P}$

Se cuantificaron las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en  $\text{mg PO}_4\text{-P/l}$  en Pi y en los flujos de Ec y Pi para cada uno de los individuos. Se tomaron medidas volumétricas para Ec en cada árbol, y se realizaron muestras combinadas de los pluviómetros para P y Pi. Luego de la recolección, las muestras de agua fueron refrigeradas y transportadas a un laboratorio certificado, donde se realizó la determinación de las concentraciones  $\text{mg PO}_4\text{-P/l}$  siguiendo el método de cromatografía iónica. Los flujos de  $\text{PO}_4\text{-P}$  ( $\text{PO}_4\text{-P mg/m}^2$ ) de cada individuo se calcularon a partir del producto entre la concentración media de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en  $\text{mg PO}_4\text{-P/l}$  y la profundidad del agua en (mm) de Pi y Ec para cada evento monitoreado. La concentración de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en la precipitación neta Pn de cada individuo se determinó como el promedio ponderado entre Pi y Ec. Además, se calculó la deposición neta (Dn) para determinar la llegada de  $\text{PO}_4\text{-P}$  a la superficie en cada individuo, así como su aporte a la fertilidad del suelo. Esto, mediante la diferencia entre el flujo de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en la precipitación neta (Pi + Ec) y el flujo de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en la precipitación incidente (Parker, 1983). Así,  $Dn = Pn (\text{PO}_4\text{-P mg.m}^{-2}) - P (\text{PO}_4\text{-P mg.m}^{-2})$ .

## Procesamiento de datos y análisis estadístico

Mediante el *software* estadístico Rstudio (2021), se verificó la normalidad y la homogeneidad de la varianza para los rasgos funcionales, los flujos hidrológicos y las concentraciones y flujos de  $\text{PO}_4\text{-P}$ , utilizando la prueba W de Shapiro-Wilk y las pruebas de Levene. Debido a la naturaleza no normal de los datos, se utilizó una prueba de Kruskal-Wallis (no paramétrica) para comparar los flujos hidrológicos, las concentraciones y los flujos de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en P, Pi y Ec entre especies y eventos. Cuando surgieron diferencias significativas en

la prueba de Kruskal-Wallis, las diferencias específicas entre especies individuales se determinaron utilizando una prueba de rango con signo de Wilcoxon *post-hoc*.

## Relaciones entre rasgos funcionales, flujos hidrológicos y concentraciones de $\text{PO}_4\text{-P}$

Se determinaron los coeficientes de correlación de Spearman entre las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en los flujos de partición de la precipitación (Ec, Pi, y la Dn) y los rasgos funcionales evaluados. Para observar las asociaciones y agrupaciones entre los rasgos funcionales y la llegada de  $\text{PO}_4\text{-P}$  al suelo en los flujos de partición de la precipitación y su deposición al suelo en todos los individuos, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) entre los rasgos funcionales medidos que presentaron relaciones significativas con la deposición neta (Dn) y las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en los flujos de partición de la precipitación de escorrentía cortical (Ec) y precipitación interna (Pi).

## Relaciones entre características hidrometeorológicas de los eventos de precipitación con las concentraciones y la deposición de $\text{PO}_4\text{-P}$ que llegan al suelo

Se analizaron los valores promedio de las características hidrológicas en cada uno de los eventos de precipitación monitoreados, *i.e.*, intensidad (Int), duración (Dr), magnitud (Pi) y días secos antes del evento (Ds), y las variables meteorológicas de temperatura (Temp), humedad relativa (hum), velocidad (V) y dirección del viento (Dv). Esto, para cada uno de los eventos de precipitación monitoreados. Se determinaron las relaciones entre la Dn y las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  que llegan al suelo en los flujos de partición de la precipitación de escorrentía cortical y precipitación interna, utilizando los coeficientes de correlación de Spearman y comparando los valores promedio entre eventos.

## RESULTADOS

### Rasgos funcionales en árboles aislados

Los valores de área foliar en *N. reticulata* y *L. seemannii* fueron más altos (113.92 cm<sup>2</sup> y 100.10 cm<sup>2</sup> respectivamente), mientras que *C. pyriformis* presentó los valores más bajos (22.50 cm<sup>2</sup>), con diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con *N. reticulata*. En rasgos como la densidad de copa, *N. reticulata* (71.05 %) presentó los mayores valores, mientras *C. odorata* (16.12 %), mostró los menores valores, con diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Además, *N. reticulata* presentó los valores más altos en cuanto al porcentaje de cobertura de epífitas en el tronco (62.31 %), seguida de *L. seemannii* (53.78 %), con diferencias significativas con la especie *C. pyriformis* ( $p < 0.05$ ) (Tabla 1).

### Partición de la precipitación en árboles aislados

La precipitación promedio durante el periodo de estudio fue de 32.2 mm.evento<sup>-1</sup>, con un CV de 0.41, donde la precipitación interna promedio fue de 29.60 mm.evento<sup>-1</sup>, junto con un porcentaje de contribución 91.18 % en el agua que llega al suelo

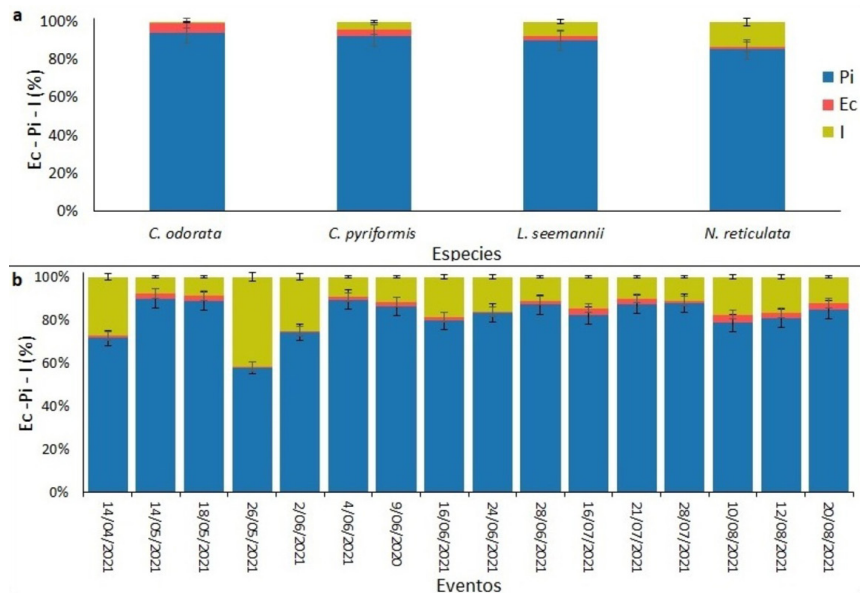
(Figura 2). Como se esperaba, la Ec fue el flujo que presentó la menor contribución, con un promedio de 0.41 mm.evento<sup>-1</sup>, correspondiente al 1.28 % del agua que llega al suelo. La interceptación promedio en los árboles aislados fue de 2.29 mm, lo que corresponde al 7.08 % de agua que se queda retenida en el dosel (Figura 2).

### Concentración y deposición neta de PO<sub>4</sub>-P en los flujos de partición de la precipitación en árboles aislados

No se encontraron concentraciones mgPO<sub>4</sub>-P/l en la precipitación incidente en los 16 eventos monitoreados, mientras que, en los flujos de partición de la precipitación, la Ec presentó las mayores concentraciones mgPO<sub>4</sub>-P/l en todos los individuos. *N. reticulata* y *L. seemannii*, con valores de 1.56 mgPO<sub>4</sub>-P/l y 1.40 mgPO<sub>4</sub>-P/l, tuvieron las mayores concentraciones de mgPO<sub>4</sub>-P/l en Ec, seguidas de *C. odorata* con 0.32 mgPO<sub>4</sub>-P/l y *C. pyriformis* con 0.21 mgPO<sub>4</sub>-P/l. Se encontraron diferencias significativas de Ec entre las especies *N. reticulata* y *C. pyriformis* ( $p < 0.05$ ). La Pi presentó concentraciones promedio de 0.32 mgPO<sub>4</sub>-P/l, donde la especie *N. reticulata*, con valores de 0.48 mgPO<sub>4</sub>-P/l, mostró las mayores concentraciones, seguida

**Tabla 1.** Promedio por especie de los rasgos funcionales medidos: altura de la copa (AC), área de la copa (área C), densidad de la copa (DC), índice de ramificación (IR), área foliar (AF), densidad x volumen (dxV), cobertura de epífitas en el tronco (CE), ángulo de la rama principal (ARP) y diámetro (DAP), evaluados en 4 especies arbóreas aisladas *C. pyriformis*, *C. odorata*, *L. seemannii* y *N. reticulata*. () representa la desviación estándar. Los valores con diferentes superíndices indican diferencias significativas entre especies

	<i>Cariniana pyriformis</i>	<i>Cedrela odorata</i>	<i>Luehea seemannii</i>	<i>Nectandra reticulata</i>
AC (m)	20.46(±13.64) <sup>abc</sup>	17.81(±2.64) <sup>abc</sup>	33.92(±7.59) <sup>abc</sup>	16.53(±4.18) <sup>abc</sup>
Área C (m <sup>2</sup> )	17.11(±4.85) <sup>abc</sup>	8.65(±3.50) <sup>abc</sup>	18.99(±5.67) <sup>abc</sup>	14.5(±5.57) <sup>abc</sup>
DC (%)	35.42(±20.41) <sup>abc</sup>	16.12(±3.88) <sup>b</sup>	42.73(±3.59) <sup>abc</sup>	71.05(±5.93) <sup>c</sup>
IR ()	18.24(±9.48) <sup>abc</sup>	12.59(±13.47) <sup>abc</sup>	28.08(±2.88) <sup>abc</sup>	25.41(±10.03) <sup>abc</sup>
ARP (°)	41.35(±8.93) <sup>abc</sup>	46.12(±34.83) <sup>abc</sup>	25.25(±4.76) <sup>abc</sup>	28.58(±9.85) <sup>abc</sup>
DAP (m <sup>2</sup> )	1.21(±0.22) <sup>abc</sup>	1.03(±0.09) <sup>abc</sup>	1.77(±0.38) <sup>abc</sup>	0.98(±0.30) <sup>abc</sup>
d x V	1936.4(±988.0) <sup>abc</sup>	250.6(±127.5) <sup>abc</sup>	3718.2(±1762.5) <sup>abc</sup>	828.29(±672.2) <sup>abc</sup>
AF (cm <sup>2</sup> )	22.50(±2.28) <sup>b</sup>	53.97(±8.89) <sup>abc</sup>	100.10(±24.55) <sup>abc</sup>	113.92(±14.96) <sup>c</sup>
CE (%)	4.98(±2.40) <sup>b</sup>	16.05(±4.89) <sup>abc</sup>	53.78(±8.13) <sup>c</sup>	62.31(±4.32) <sup>c</sup>



**Figura 2.** a) Porcentajes promedio de contribución de los flujos de partición de la precipitación (P): escorrentía cortical (Ec), interceptación (I) y precipitación interna (Pi), monitoreados en 16 eventos individuales. b) Promedio de los flujos de partición de la precipitación para 16 eventos individuales de precipitación medidos en 4 especies arbóreas nativas aisladas del bosque húmedo modificado

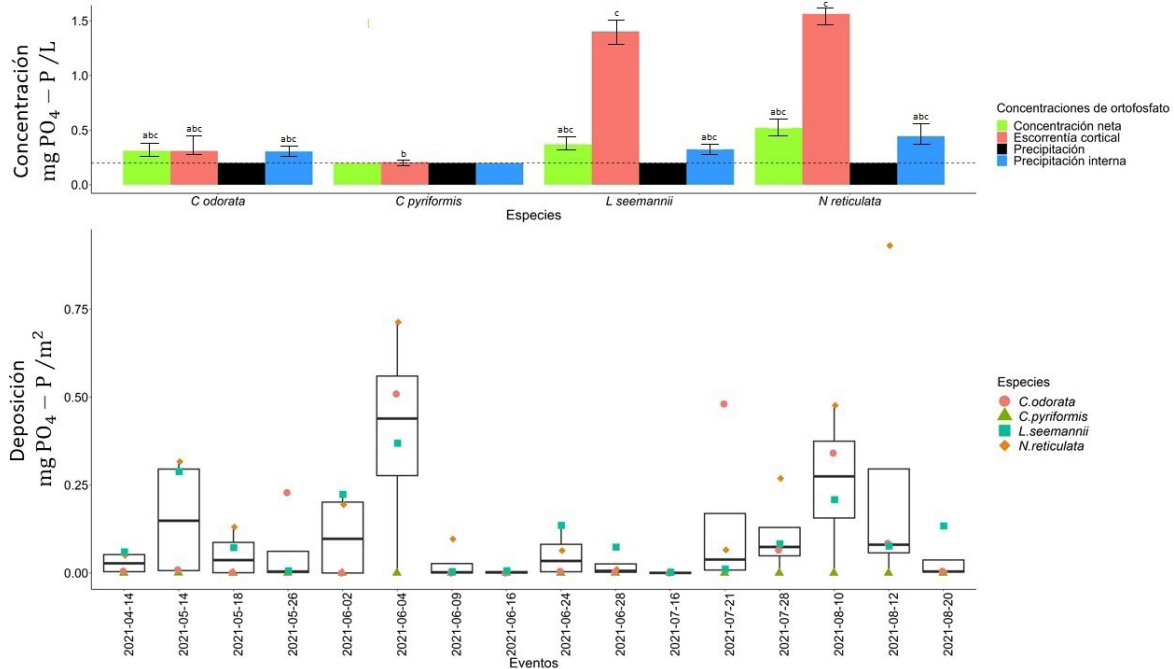
de *L. seemannii* con  $0.35 \text{ mgPO}_4\text{-P/l}$ , *C. odorata* con  $0.30 \text{ mgPO}_4\text{-P/l}$  y *C. pyriformis*, que no superó el límite de detección (Figura 3a).

Las concentraciones netas de ortofosfatos, medida en  $\text{mgPO}_4\text{-P/l}$  que llega al suelo en las diferentes especies, son de 0.51, 0.37, 0.31, y 0.1  $\text{mgPO}_4\text{-P/l}$  para *N. reticulata*, *L. seemannii*, *C. odorata* y *C. pyriformis* respectivamente, con diferencias significativas entre las especies *N. reticulata*, y *C. pyriformis* ( $p < 0.05$ ). La especie *N. reticulata* presentó el mayor promedio en la deposición neta ( $0.22 \text{ mgPO}_4\text{-P/m}^2$ ), seguida por *L. seemannii* ( $0.14 \text{ mgPO}_4\text{-P/m}^2$ ). En general, la mayor deposición de  $\text{PO}_4\text{-P}$  se observó en eventos de precipitación de menor intensidad (Figuras 2b y 3b).

### Rasgos funcionales y sus relaciones con las concentraciones y la deposición de $\text{PO}_4\text{-P}$

Se encontraron coeficientes de relación positivos entre los rasgos funcionales y las concentraciones de ortofosfatos ( $\text{mgPO}_4\text{-P/l}$ ) que llegan al suelo en los flujos de Pi y Ec. Las relaciones más

significativas entre los flujos de Pi y Ec se observaron con los rasgos de área foliar ( $p=0.64$ ,  $p=0.73$ ), cobertura de epífitas ( $p=0.53$ ,  $p=0.62$ ), densidad de la copa ( $p=0.76$ ,  $p=0.60$ ) y el índice de ramificación ( $p=0.15$ ) (Tabla 2), mientras que la altura de la copa mostró coeficientes de relación negativos ( $p=-0.81$ ) con las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en la Pi. En la Dn, se encontraron relaciones positivas significativas con rasgos como área foliar ( $p=0.63$ ), cobertura de epífitas ( $p=0.50$ ) y densidad de la copa ( $p=0.57$ ). El ACP (Anexo 1) explicó el 64.75 % de la varianza, donde el primer componente representa el 47.09 %. Las mayores contribuciones en el primer componente son el área foliar (-0.47) y la cobertura de epífitas (-0.50), mientras que el segundo componente representó el 17.66% de la varianza, en el cual la mayor contribución se observó en el índice de ramificación (-0.62), seguido por la densidad de la copa (-0.45). Los individuos evaluados se distribuyeron en 2 grupos caracterizados por sus rasgos funcionales, donde la cobertura de epífitas, el área foliar y el porcentaje de densidad de la copa estaban asociados con



**Figura 3.** a) Promedio de las concentraciones de  $PO_4-P$  en los flujos de partición de la precipitación, escorrentía cortical (Ec), precipitación interna (Pi) y promedio ponderado en la concentración neta (Cn), para 16 eventos individuales de precipitación medidos entre 14/04/2021 y 20/08/2021. Los valores con diferentes superíndices indican diferencias significativas entre especies. b) Deposición neta (Dn) en las 4 especies evaluadas para los 16 eventos monitoreados. Los valores que están por debajo de la línea negra no sobrepasan el límite de detección

las mayores concentraciones de  $PO_4-P$  al suelo en las especies *N. reticulata* y *L. seemannii* (Anexo 1).

### Relación entre las condiciones hidrometeorológicas y las concentraciones y la deposición de $PO_4-P$ en el suelo

Se encontraron relaciones significativas entre los días secos antes de los eventos de precipitación y las concentraciones de ortofosfatos ( $mgPO_4-P/l$ ) en Pi ( $p=0.81$ ) y Ec ( $p=0.55$ ) (Anexo 2). La intensidad de la precipitación mostró una relación significativa y negativa con la Ec ( $p=-0.46$ ), mientras que la duración de cada evento tuvo relaciones negativas significativas con la Pi ( $p=-0.36$ ). La deposición neta presentó relaciones significativas con los días secos antes del evento ( $p=0.64$ ). Las otras variables evaluadas, *i.e.*, temperatura, humedad y velocidad del viento, no mostraron relaciones significativas con las concentraciones de  $PO_4-P$  en los flujos de

partición de la precipitación y la deposición neta que llegan al suelo (Anexo 2).

## DISCUSIÓN

### Partición de la precipitación en árboles aislados

Los resultados obtenidos en la (Figura 2a) muestran la capacidad que tienen los árboles aislados para la regulación hidrológica en paisajes interandinos tropicales modificados, valores que se encuentran en relación con otros estudios de árboles aislados en ecosistemas tropicales (Ilstedt *et al.*, 2016; Baptista *et al.*, 2018; Nytych *et al.*, 2019). Las variaciones en los flujos de partición de la precipitación observadas en este estudio se pueden atribuir a cambios en la configuración de los rasgos funcionales de cada especie (Tabla 1)



**Tabla 2.** Coeficientes de relación entre los rasgos funcionales: altura de la copa (AC), área de la copa (área C), densidad de la copa (DC), índice de ramificación (IR), área foliar (AF), densidad x volumen (dxV), cobertura de epífitas en el tronco (CE), ángulo de la rama principal (ARP) y diámetro (DAP). Con las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  que llegan al suelo en precipitación interna ( $[\text{PO}_4\text{-P}] \text{ Pi}$ ), escorrentía cortical ( $[\text{PO}_4\text{-P}] \text{ Ec}$ ) y la deposición neta ( $\text{Dn } \text{PO}_4\text{-P}$ ) en cada una de las especies evaluadas. ( ): significancia de las correlaciones

Rasgos/Concentraciones $\text{PO}_4\text{-P}$	$[\text{PO}_4\text{-P}] \text{ Pi}$	$[\text{PO}_4\text{-P}] \text{ Ec}$	$\text{Dn } \text{PO}_4\text{-P}$
AC (m)	<b>-0.81(0.03)</b>	0.68(0.41)	0.72(0.38)
AreaC ( $\text{m}^2$ )	-0.82(0.35)	-0.71(0.46)	-0.84(0.31)
DC (%)	<b>0.76(0.01)</b>	<b>0.60(0.04)</b>	<b>0.62(0.05)</b>
IR ( )	<b>0.15(0.02)</b>	0.74(0.23)	-0.68(0.31)
ARP (°)	-0.63(0.54)	-0.42(0.25)	-0.46(0.20)
DAP( $\text{m}^2$ )	-0.33(0.14)	-0.41(0.25)	-0.27(0.11)
dxV	0.54(0.33)	0.02(0.12)	0.71(0.23)
AF ( $\text{cm}^2$ )	<b>0.64(0.03)</b>	<b>0.73(0.01)</b>	<b>0.63(0.05)</b>
CE (%)	<b>0.53(0.005)</b>	<b>0.62(0.02)</b>	0.50(0.04)

y las características hidrometeorológicas de cada evento de precipitación. Los mayores porcentajes de interceptación de agua en individuos de las especies *N. reticulata* y *L. seemannii* están asociados a una composición característica de rasgos, como mayores valores para el área foliar y la cobertura de epífitas en el tronco (Tabla 1). Estos resultados están relacionados con otros estudios en ecosistemas boscosos y árboles individuales, donde se han encontrado relaciones entre el área foliar y la cobertura de epífitas, con una mayor superficie de deposición e interceptación de la precipitación, lo cual permite una mayor regulación de agua en las estructuras del dosel y disminuye la caída directa al suelo (Oliva Carrasco *et al.*, 2015; Baptista *et al.*, 2018; Porada *et al.*, 2018; Sadeghi *et al.*, 2018; Magliano *et al.*, 2019).

### Circulación de $\text{PO}_4\text{-P}$ en árboles aislados

En la Figura 3 se confirma que los árboles aislados en paisajes interandinos tropicales modificados tienen la capacidad de aumentar la disponibilidad y las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en la superficie bajo la copa. En general, las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  fueron bajas en todos los individuos (Figura 3a), similares a las que se han observado

en otros estudios en bosques andinos tropicales (Suescún *et al.*, 2021). La precipitación no representó una entrada directa de  $\text{PO}_4\text{-P}$  al suelo (Figura 3a). Estos resultados difieren con los de otros estudios en bosques tropicales donde se han reportado concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en la precipitación (Runyan *et al.*, 2013; Vandecar *et al.*, 2015; Wilcke *et al.*, 2019). El aumento en las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en los flujos de partición de la precipitación que llegaron a la superficie pueden estar influenciados por la lixiviación de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en el dosel, el intercambio de solutos al contacto con la lluvia y el transporte de aerosoles y polvo en la atmósfera que se depositan en las estructuras de los árboles, los cuales llegan al suelo al ser impulsados por la precipitación (Vandecar *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2018; Sohr *et al.*, 2019).

Como se observa en la Figura 3, la escorrentía cortical presentó las mayores concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  que llegan a la superficie en los flujos de partición de la precipitación en todas las especies evaluadas. Se ha demostrado que, en ecosistemas boscosos, la Ec presenta una mayor carga de  $\text{PO}_4\text{-P}$  al suelo, al tener una mayor interacción con las estructuras del dosel, lo que la convierte en un importante recurso que llega a la zona radicular (Oka *et al.*, 2021; Suescún *et al.*, 2021). *N. reticulata* y

*L. seemannii*, con una configuración de rasgos característicos como mayor área foliar, densidad de la copa y cobertura de epífitas, mostraron las mayores concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en los flujos que llegan a la superficie (Figura 3a). El área foliar y la cobertura de epífitas presentaron relaciones significativas con los flujos de partición de la precipitación (Tabla 2), características que potencialmente influyen en la capacidad de las especies para interceptar y movilizar  $\text{PO}_4\text{-P}$  en el dosel, al aumentar el área de recepción para aerosoles y partículas transportadas por la atmósfera que pueden enriquecer los flujos que llegan al suelo (Runyan et al., 2013; Lira-Martins et al., 2019; Ginebra-Solanellas et al., 2020), mientras que las bajas concentraciones que se presentaron en *C. pyriformis* pueden estar asociadas con la retención del  $\text{PO}_4\text{-P}$  en el dosel, como se ha reportado en otras especies de árboles tropicales (Zhou et al., 2018; Sohr et al., 2019; Suescún et al., 2021).

### Rasgos funcionales y su influencia en los flujos de agua y $\text{PO}_4\text{-P}$ en paisajes modificados

A pesar del bajo número de individuos que contempla este estudio ( $n=16$ ), nuestros resultados evidencian cómo los rasgos funcionales de árboles aislados pueden ayudar a explicar funciones ecosistémicas como la regulación hidrológica y de  $\text{PO}_4\text{-P}$  a escala de paisaje en ecosistemas modificados (Anexo 1). Rasgos funcionales como la densidad de la copa, el área foliar y la cobertura de epífitas se destacan como características determinantes para la interceptación y redistribución de la precipitación, mejorando la regulación hidrológica a escala local (Figura 2). Estos resultados guardan relación con estudios en bosques tropicales, donde se ha demostrado que los rasgos foliares y la cobertura de epífitas determinan la variabilidad de los flujos de agua que atraviesan el dosel (Van Stan & Pypker, 2015; Porada et al., 2018). Además, se ha observado que una configuración característica de rasgos funcionales, como un área foliar y

una densidad de la copa más altas, aumentan el tiempo, el área de recepción, y la capacidad de interceptación (Lira-Martins et al., 2019; Anna et al., 2020).

Las mayores concentraciones y deposición de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en los flujos de partición de la precipitación se presentaron en individuos de las especies *N. reticulata* y *L. seemannii*, los cuales mostraron una combinación característica de rasgos funcionales como mayor área foliar, densidad de la copa y cobertura de epífitas. Estas características funcionales, como se ha observado en bosques tropicales, están relacionadas con la capacidad que tienen las hojas y las epífitas para el intercambio de nutrientes a través de la lixiviación, lo cual influye en la circulación de solutos como el  $\text{PO}_4\text{-P}$  y en el enriquecimiento de los flujos de agua que llegan al suelo (Kumar Gautam et al., 2017; Sohr et al., 2019; Lu et al., 2020). El mayor índice de ramificación en los individuos de *N. reticulata* y *L. seemannii* puede estar asociado a un mayor recorrido y una mayor interacción de la lluvia en las superficies de las ramas y las cortezas, ayudando a enriquecer los flujos de partición de la precipitación (Lira-Martins et al., 2019; Su et al., 2019; Oka et al., 2021). Además, la mayor cobertura de epífitas en estos individuos, como se ha observado en ecosistemas boscosos, puede condicionar los flujos hidroquímicos que llegan al suelo, debido a la capacidad que tienen las epífitas para absorber, retener y enriquecer los flujos de agua que atraviesan el dosel (Van Stan & Pypker, 2015).

### Condiciones hidrometeorológicas de los eventos de precipitación y su relación con los flujos de agua y $\text{PO}_4\text{-P}$

Los resultados que se muestran en el Anexo 2 indican que las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  que llegan al suelo en los flujos de partición de la precipitación pueden ser modificados temporalmente. Esto, de acuerdo con las características de cada evento de lluvia y las condiciones hidrometeorológicas antecedentes. Las variables hidrológicas, tales

como una mayor cantidad de días secos antes del evento y una menor intensidad y magnitud en la precipitación, influyen en la interceptación de agua en el dosel y, por tanto, el aumento en el flujo del tallo y la precipitación interna, lo cual puede diluir las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  que llegan a la superficie (Runyan *et al.*, 2013; Su *et al.*, 2019). Entretanto, el mayor número de días secos antes de la precipitación está relacionado con una mayor carga de aerosoles y partículas en la atmósfera que se depositan en el dosel, y que luego pueden ser transportadas al suelo a través de los flujos de partición de la precipitación (Wilcke *et al.*, 2019; Chiwa, 2020).

## CONCLUSIONES

Este estudio muestra la capacidad que tienen los árboles aislados para la circulación y deposición de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en el suelo en paisajes interandinos tropicales modificados, donde la circulación interna permite el enriquecimiento de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en los flujos de partición de la precipitación que llegan al suelo. La regulación hidrológica, así como la circulación y el enriquecimiento de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en árboles aislados, responde a una configuración de rasgos específicos, tales como una mayor cobertura de epífitas, una mayor área foliar y un mayor porcentaje en densidad de la copa, los cuales se observaron como rasgos característicos de las especies *N. reticulata* y *L. seemannii*.

Nuestros resultados aportan al conocimiento de las relaciones entre la precipitación y los árboles aislados, que pueden ser útiles en la gestión de ecosistemas modificados, mejorando la comprensión de la variabilidad espaciotemporal de la regulación hidrológica y la capacidad de los rasgos funcionales para influenciar el enriquecimiento de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en el suelo. Estos resultados resaltan el papel que cumplen los rasgos funcionales, que constituyen una herramienta para la selección de características que ayuden en procesos de restauración

ecológica y en el mejoramiento de las condiciones biogeoquímicas del suelo a escala de paisaje.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, a través de la convocatoria interna de investigación. Además, agradecemos a María Eugenia Aguirre, Milady Guzmán y Maribel Duque por su apoyo en las actividades de campo.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaramos no tener conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

S. V. S. ideó la investigación, S. V. S. y K. Q. llevaron a cabo la investigación en terreno, S. V. S. analizó los datos y redactó el manuscrito. Todos los autores contribuyeron a la discusión y comentaron los borradores.

## REFERENCIAS

- Anna, K. I., Sylwia, Ł., Marcin, Z., Ewa, S. O., & Wojtan, B. (2020). Variability of leaf wetting and water storage capacity of branches of 12 deciduous tree species. *Forests*, 11(11), 1158. <https://doi.org/10.3390/f11111158>
- Baptista, M. D., Livesley, S. J., Parmehr, E. G., Neave, M., & Amati, M. (2018). Variation in leaf area density drives the rainfall storage capacity of individual urban tree species. *Hydrological Processes*, 32(25), 3729-3740. <https://doi.org/10.1002/hyp.13255>
- Cano-Arboleda, L. V., Villegas, J. C., Restrepo, A. C., & Quintero-Vallejo, E. (2022). Complementary

- effects of tree species on canopy rainfall partitioning: New insights for ecological restoration in Andean ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 507(September 2021), 119969.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119969>
- Chiwa, M.** (2020). Ten-year determination of atmospheric phosphorus deposition at three forested sites in Japan. *Atmospheric Environment*, 223(December), 117247.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117247>
- Dantas de Paula, M., Forrest, M., Langan, L., Bendix, J., Homeier, J., Velescu, A., Wilcke, W., & Hickler, T.** (2021). Nutrient cycling drives plant community trait assembly and ecosystem functioning in a tropical mountain biodiversity hotspot. *New Phytologist*, 232(2), 551-566.  
<https://doi.org/10.1111/nph.17600>
- Duque-Gardeazábal, N., Zamora, D., Vega-Viviescas, C., Arboleda, P., & Rodríguez, E.** (2018). Analysis of precipitation features estimated by reanalysis datasets in the Magdalena Cauca Macrobasin, Colombia. *Revista Hidrolatinoamericana de Jóvenes Investigadores y Profesionales*, 2(1), 22-25.  
[http://iahr.org/Web/News\\_Journals/Journals/Journal\\_of\\_Latin\\_American\\_Young\\_Professionals/Portal/Journals/Journal\\_of\\_Latin\\_American\\_Young\\_Professionals.aspx?hkey=a5e8f214-5ee1-4054-9dd5-877170aadf62](http://iahr.org/Web/News_Journals/Journals/Journal_of_Latin_American_Young_Professionals/Portal/Journals/Journal_of_Latin_American_Young_Professionals.aspx?hkey=a5e8f214-5ee1-4054-9dd5-877170aadf62)
- Ellsworth, D. S., Crous, K. Y., De Kauwe, M. G., Verryckt, L. T., Goll, D., Zaehle, S., Bloomfield, K. J., Ciais, P., Cernusak, L. A., Domingues, T. F., Dusenge, M. E., García, S., Guerrieri, R., Ishida, F. Y., Janssens, I. A., Kenzo, T., Ichie, T., Medlyn, B. E., Meir, P., ... Wright, I. J.** (2022). Convergence in phosphorus constraints to photosynthesis in forests around the world. *Nature Communications*, 13(1), 5005.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-32545-0>
- Fleischer, K., Rammig, A., De Kauwe, M. G., Walker, A. P., Domingues, T. F., Fuchslueger, L., García, S., Goll, D. S., Grandis, A., Jiang, M., Haverd, V., Hoffmann, F., Holm, J. A., Kruijt, B., Leung, F., Medlyn, B. E., Mercado, L. M., Norby, R. J., Pak, B., ... Lapola, D. M.** (2019). Amazon forest response to CO<sub>2</sub> fertilization dependent on plant phosphorus acquisition. *Nature Geoscience*, 12(9), 736-741.  
<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0404-9>
- Ginebra-Solanellas, R. M., Holder, C. D., Lauderbaugh, L. K., & Webb, R.** (2020). The influence of changes in leaf inclination angle and leaf traits during the rainfall interception process. *Agricultural and Forest Meteorology*, 285-286(January), 107924.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107924>
- Hou, E., Luo, Y., Kuang, Y., Chen, C., Lu, X., Jiang, L., Luo, X., & Wen, D.** (2020). Global meta-analysis shows pervasive phosphorus limitation of aboveground plant production in natural terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 11(1), 637.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-14492-w>
- Ilstedt, U., Bargaés Tobella, A., Bazié, H. R., Bayala, J., Verbeeten, E., Nyberg, G., Sanou, J., Benegas, L., Murdiyarso, D., Laudon, H., Sheil, D., & Malmer, A.** (2016). Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Scientific Reports*, 6(February), 21930.  
<https://doi.org/10.1038/srep21930>
- Kumar Gautam, M., Lee, K. S., & Song, B. Y.** (2017). Deposition pattern and throughfall fluxes in secondary cool temperate forest, South Korea. *Atmospheric Environment*, 161(June 2018), 71-81.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.04.030>
- Lira-Martins, D., Humphreys-Williams, E., Strekopytov, S., Ishida, F. Y., Quesada, C. A., & Lloyd, J.** (2019). Tropical tree branch-leaf nutrient scaling relationships vary with sampling location. *Frontiers in Plant Science*, 10(July), 877.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00877>
- Lu, X., Liu, Y., Liu, L., Zhang, Z., Hu, F., Liu, X., & Sun, X.** (2020). Rainfall partitioning and associated nitrate and sulfate fluxes along a slope gradient in a subtropical broadleaved forest. *Journal of Hydrology*, 591(May), 125584.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125584>
- Luna-Robles, E. O., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., Marmolejo-Monsiváis, J. G., Yáñez-Díaz, M. I., & Béjar-Pulido, S. J.** (2019). Nutrient input via gross rainfall, throughfall and stemflow in scrubland species in northeastern Mexico. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 25(2), 235-251.

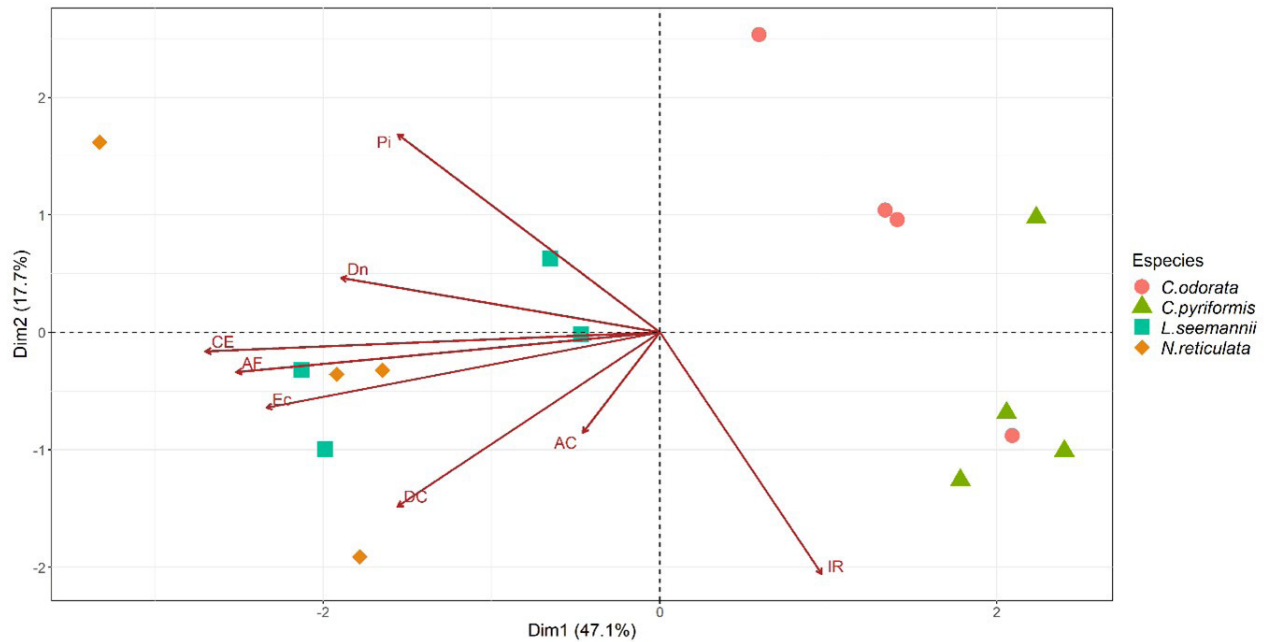


- <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.12.096>
- Magliano, P. N., Whitworth-Hulse, J. I., Florio, E. L., Aguirre, E. C., & Blanco, L. J.** (2019). Interception loss, throughfall and stemflow by *Larrea divaricata*: The role of rainfall characteristics and plant morphological attributes. *Ecological Research*, 34(6), 753-764.  
<https://doi.org/10.1111/1440-1703.12036>
- National Institutes of Health** (2019). *Image J, Image processing and analysis in Java*.  
<https://imagej.nih.gov/ij/index.html>
- Nytch, C. J., Meléndez-Ackerman, E. J., Pérez, M. E., & Ortiz-Zayas, J. R.** (2019). Rainfall interception by six urban trees in San Juan, Puerto Rico. *Urban Ecosystems*, 22(1), 103-115.  
<https://doi.org/10.1007/s11252-018-0768-4>
- Oka, A., Takahashi, J., Endoh, Y., & Seino, T.** (2021). Bark effects on stemflow chemistry in a Japanese temperate forest I. The role of bark surface morphology. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4(April), 654375.  
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.654375>
- Oliva Carrasco, L., Bucci, S. J., Di Francescantonio, D., Lezcano, O. A., Campanello, P. I., Scholz, F. G., Rodríguez, S., Madanes, N., Cristiano, P. M., Hao, G. Y., Holbrook, N. M., & Goldstein, G.** (2015). Water storage dynamics in the main stem of subtropical tree species differing in wood density, growth rate and life history traits. *Tree Physiology*, 35(4), 354-365.  
<https://doi.org/10.1093/treephys/tpu087>
- Parker, G. G.** (1983). Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research*, 13(C), 57-133.  
[https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60108-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60108-7)
- Porada, P., Van Stan, J. T., & Kleidon, A.** (2018). Significant contribution of non-vascular vegetation to global rainfall interception. *Nature Geoscience*, 11(8), 563-567.  
<https://doi.org/10.1038/s41561-018-0176-7>
- RStudio Team.** (2021). *RStudio: integrated development environment for R*.  
<http://www.rstudio.com/>
- Rodríguez Torres, L. D.** (2021). *Análisis multitemporal utilizando imágenes Landsat para la determinación de la pérdida de la capacidad productiva en la cuenca media del Río Magdalena* [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada].  
<http://hdl.handle.net/10654/38983>
- Runyan, C. W., D'Odorico, P., Vandecar, K. L., Das, R., Schmook, B., & Lawrence, D.** (2013). Positive feedbacks between phosphorus deposition and forest canopy trapping, evidence from Southern Mexico. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4), 1521-1531.  
<https://doi.org/10.1002/2013JG002384>
- Sadeghi, S. M. M., Van Stan, J. T., Pypker, T. G., Tamjidi, J., Friesen, J., & Farahnaklangroudi, M.** (2018). Importance of transitional leaf states in canopy rainfall partitioning dynamics. *European Journal of Forest Research*, 137(1), 121-130.  
<https://doi.org/10.1007/s10342-017-1098-4>
- Salgado-Negret, B.** (2016). *Ecología funcional como aproximación al estudio, conservación, manejo y conservación de la biodiversidad*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.  
<http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=catt02704a&AN=unc.000838205&lang=es&site=eds-live>
- Sohrt, J., Uhlig, D., Kaiser, K., von Blanckenburg, F., Siemens, J., Seeger, S., Frick, D. A., Krüger, J., Lang, F., & Weiler, M.** (2019). Phosphorus fluxes in a temperate forested watershed: Canopy leaching, runoff sources, and in-stream transformation. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2(December), 85.  
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00085>
- Su, L., Zhao, C., Xu, W., & Xie, Z.** (2019). Hydrochemical fluxes in bulk precipitation, throughfall, and stemflow in a mixed evergreen and deciduous broadleaved forest. *Forests*, 10(6), 507.  
<https://doi.org/10.3390/f10060507>
- Suescún, D., Villegas, J. C., León, J. D., & 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, and Soil Pollution*, 232(6), 250.  
<https://doi.org/10.1007/s11270-021-05195-z>



- van Stan, J. T., & Allen, S. T.** (2020). What we know about stemflow's infiltration area. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3(May), 61.  
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00061>
- van Stan, J. T., & Pypker, T. G.** (2015). A review and evaluation of forest canopy epiphyte roles in the partitioning and chemical alteration of precipitation. *Science of the Total Environment*, 536, 813-824.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.134>
- Vandecar, K. L., Runyan, C. W., D'Odorico, P., Lawrence, D., Schmook, B., & Das, R.** (2015). Phosphorus input through fog deposition in a dry tropical forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(12), 2493-2504.  
<https://doi.org/10.1002/2015JG002942>
- Vitousek, P. M., Porder, S., Houlton, B. Z., Oliver, A., Vitousek, P. M., Porder, S., Houlton, B. Z., & Chadwick, O. A.** (2010). *Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions*.  
<http://www.jstor.org/stable/27797785>
- Wilcke, W., Velescu, A., Leimer, S., Bigalke, M., Boy, J., & Valarezo, C.** (2019). Temporal trends of phosphorus cycling in a tropical montane forest in Ecuador during 14 years. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 124(5), 1370-1386.  
<https://doi.org/10.1029/2018JG004942>
- Yue, K., De Frenne, P., Fornara, D. A., Van Meerbeek, K., Li, W., Peng, X., Ni, X., Peng, Y., Wu, F., Yang, Y., & Peñuelas, J.** (2021). Global patterns and drivers of rainfall partitioning by trees and shrubs. *Global Change Biology*, 27(14), 3350-3357.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.15644>
- Zhou, K., Lu, X., Mori, T., Mao, Q., Wang, C., Zheng, M., Mo, H., Hou, E., & Mo, J.** (2018). Effects of long-term nitrogen deposition on phosphorus leaching dynamics in a mature tropical forest. *Biogeochemistry*, 138(2), 215-224.  
<https://doi.org/10.1007/s10533-018-0442-1>

## ANEXOS



**Anexo 1.** Análisis de componentes principales entre los rasgos funcionales medidos que presentan relaciones significativas: densidad de la copa (DC), índice de ramificación (IR), altura de la copa (AC), área foliar (AF) y cobertura de epífitas en el tronco (CE), con la deposición neta (Dn) y las concentraciones de  $\text{PO}_4\text{-P}$  en los flujos de partición de la precipitación: escorrentía cortical (Ec) y precipitación interna (Pi)

**Anexo 2.** Coeficientes de relación entre las condiciones hidrometeorológicas de cada evento de precipitación y flujos de ortofosfato que llegan al suelo en especies arbóreas aisladas en ecosistemas modificados. ( ): significancia de las relaciones

Variables hidrometeorológicas / Concentraciones $\text{PO}_4\text{-P}$	$[\text{PO}_4\text{-P}] \text{ Pi}$	$[\text{PO}_4\text{-P}] \text{ Ec}$	$\text{Dn } \text{PO}_4\text{-P}$
P (mm)	-0.44(0.08)	-0.37(0.12)	-0.36(0.16)
Int (mm/h)	-0.51(0.31)	<b>-0.46(0.04)</b>	-0.41(0.09)
Dr (horas)	<b>-0.36(0.03)</b>	-0.31(0.23)	-0.41(0.78)
Ds (días)	<b>0.81(0.04)</b>	<b>0.55(0.05)</b>	<b>0.64(0.05)</b>
Temp (°)	-0.20(0.08)	-0.22(0.12)	-0.15(0.11)
Hum (%)	0.23(0.27)	0.34(0.08)	-0.02(0.06)
V (m/s)	-0.49(0.38)	-0.50(0.12)	-0.39(0.41)

