

Revista Cubana de  
Ciencias Forestales




CFORES

Volumen 12, número 2; 2024

## *Incidencia de **Hevea brasiliensis** sobre las propiedades químicas del suelo en la Amazonia colombiana*

*Incidence of **Hevea brasiliensis** on the chemical properties of the soil in the Colombian Amazon*

*Incidência de **Hevea brasiliensis** nas propriedades químicas do solo da Amazônia colombiana*

Gelber Rosas-Patiño<sup>1\*</sup> , Jader Muñoz-Ramos<sup>2</sup> , Verenice Sánchez-Castillo<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia.

<sup>2</sup>Universidad del Tolima, Ibagué, Tolima, Facultad de Ingeniería forestal, Colombia.

<sup>3</sup>Universidad de la Amazonia, Facultad de Ingeniería, Florencia, Caquetá, Colombia.

\*Autor para correspondencia: g.rosas@udla.edu.co

**Recibido:** 22/05/2024

**Aprobado:** 16/06/2024.



## RESUMEN

El cultivo de *Hevea brasiliensis*, caucho, se promueve como alternativa productiva y ecológica, especialmente en sistemas agroforestales, que aborden su impacto en las condiciones químicas del suelo. Este estudio tuvo como objetivo evaluar los posibles efectos de cinco tipos de uso del suelo sobre las propiedades químicas de los horizontes A y B en suelos de la Amazonia colombiana: sistema agroforestal de *H. brasiliensis* con maderables y frutales, sistema agroforestal de *H. brasiliensis* asociado a rastrojo, monocultivo de *H. brasiliensis*, bosque secundario como control positivo y pastura nativa como control negativo. Se evaluaron las condiciones de pH, aluminio intercambiable, carbono orgánico, potasio, fósforo, calcio, magnesio, saturación de bases y capacidad de intercambio catiónico. Se encontraron similitudes en las propiedades químicas del suelo entre el bosque secundario, sistema agroforestal con frutales y sistema agroforestal con rastrojo. El monocultivo de *H. brasiliensis* no presentó diferencias significativas con la pastura nativa. El pH fue la única variable afectada por el uso del suelo, mientras que el porcentaje de carbono orgánico y los contenidos de fósforo, calcio, magnesio y potasio cambiaron en función de los horizontes A y B, demostrando que la variabilidad de la fertilidad química de los suelos arcillosos de la Amazonia está más relacionada con las características propias de sus horizontes que con el tipo de uso del suelo.

**Palabras clave:** árbol de caucho, suelos de lomerío, sistema agroforestal, suelos ácidos.

---

## SUMMARY

The cultivation of *Hevea brasiliensis* (rubber) is promoted as a productive and ecological alternative, especially in agroforestry systems, although research is still required to address its impact on soil chemical conditions. This study aimed evaluate the possible effects of five types of land use on the chemical properties of horizons A and B in soils of the Colombian Amazon: agroforestry system of *H. brasiliensis* with timber and fruit trees, agroforestry system of *H. brasiliensis* associated with stubble, *H. brasiliensis* monoculture, secondary forest as positive control and native grass as negative control. The conditions of pH,



exchangeable aluminum, organic carbon, potassium, phosphorus, calcium, magnesium, base saturation and cationic exchange capacity were evaluated. Similarities in soil chemical properties were found between secondary forest, agroforestry systems with fruit trees and agroforestry systems associated with stubble. The *H. brasiliensis* monoculture did not present significant differences with the native pasture. The pH was the only variable affected by soil use, while the percentage of organic carbon and the contents of phosphorus, calcium, magnesium and potassium changed depending on the A and B horizons, demonstrating that the variability of the chemical fertility of the clay soils of the Amazon are more related to the characteristics of their horizons than to the type of land use.

**Keywords:** rubber tree, lomerío soils, agroforestry system, acid soils.

---

## RESUMO

O cultivo da *Hevea brasiliensis*, a seringueira, é promovido como alternativa produtiva e ecológica, principalmente em sistemas agrofloreais, que abordam seu impacto nas condições químicas do solo. Este estudo teve como objetivo avaliar os possíveis efeitos de cinco tipos de uso da terra nas propriedades químicas dos horizontes A e B em solos da Amazônia colombiana: sistema agrofloreais de *H. brasiliensis* com árvores madeiras e frutíferas, sistema agrofloreais de *H. brasiliensis* associado a restolho, monocultivo de *H. brasiliensis*, mata secundária como controle positivo e pastagem nativa como controle negativo. Foram avaliadas as condições de pH, alumínio trocável, carbono orgânico, potássio, fósforo, cálcio, magnésio, saturação por bases e capacidade de troca catiônica. Foram encontradas semelhanças nas propriedades químicas do solo entre floresta secundária, sistema agrofloreais com árvores frutíferas e sistema agrofloreais com restolho. A monocultura de *H. brasiliensis* não apresentou diferenças significativas com a pastagem nativa. O pH foi a única variável afetada pelo uso do solo, enquanto o percentual de carbono orgânico e os teores de fósforo, cálcio, magnésio e potássio mudaram dependendo dos horizontes A e B, demonstrando que a variabilidade da fertilidade química dos solos argilosos de na Amazônia estão mais relacionadas às características de seus horizontes do que ao tipo de uso da terra.



**Palavras-chave:** seringueira, solos de lomerío, sistema agroforestal, solos ácidos.

---

## INTRODUCCIÓN

Las propiedades químicas del suelo condicionan los procesos nutricionales de las plantas. La fertilidad química del suelo depende, entre otros aspectos, del pH, el contenido de materia orgánica, la presencia de nutrientes en solución y de aquellos adsorbidos a los coloides (Hailegnaw *et al.*, 2019).

En la Amazonia colombiana, predominan suelos de lomerío con texturas arcillosas acentuadas en el horizonte B (Rosas *et al.*, 2016). Estos suelos son ácidos, con altos contenidos de aluminio, baja saturación de bases y capacidad de intercambio catiónico limitada. Además, presentan bajos contenidos de carbono, fósforo, potasio y magnesio en sus horizontes minerales (Rosas *et al.*, 2017), lo que evidencia limitaciones agrológicas. En este contexto, la disponibilidad de nutrientes en los sistemas productivos, especialmente en los sistemas agroforestales, depende del ciclaje de la materia orgánica que ocurre en el topsoil (Celentano *et al.*, 2020).

La región amazónica en Colombia representa el 42,3 % del territorio continental del país (SIAT-AC, 2022). En los últimos 16 años, ha perdido alrededor de 5,2 % de su bosque, que se reemplaza con pasturas para la ganadería bovina, con una tasa de deforestación del 0,46 %. Sin embargo, en el departamento del Caquetá, esta tasa es aún más alta (0,77 %) (Murad y Pearse, 2018). Esta deforestación está ocasionando degradación de los suelos y la interrupción del ciclo natural de los procesos edafológicos (Franco *et al.*, 2019).

Los sistemas agroforestales (SAF) resultan una alternativa tecnológica sostenible, integrada y diversificada (Celentano *et al.*, 2020). Los SAF contribuyen a la recuperación de los suelos y promueven la creación de un ciclo de nutrientes más cerrado a través de la captura profunda de nutrientes, el aumento del suministro a través de la fijación de N, la producción y descomposición de hojarasca, así como el incremento de la actividad biológica del suelo en la agrosilvicultura (Sileshi *et al.*, 2020). De manera particular, en los suelos de la Amazonia



colombiana, caracterizados por su baja fertilidad (Suárez *et al.*, 2015), los SAF con *H. brasiliensis* aumentan el carbono orgánico en el suelo y mejoran el balance de nutrientes (Joseph *et al.*, 2022).

En la región amazónica colombiana, se establecen SAF con *H. brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll. Arg. con la finalidad de rehabilitar suelos degradados (Peña *et al.*, 2021). Estos sistemas parten del principio rector que los árboles en los SAF cumplen funciones ecológicas, como proteger el suelo, mejorar el ciclaje de nutrientes y reducir los efectos directos del sol, el agua y el viento (Nair *et al.*, 2021, Santana *et al.*, 2022). Además, contribuyen a aumentar la capacidad de intercambio catiónico y mejorar la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio (Suárez *et al.*, 2015). Sin embargo, no existe suficiente claridad sobre las posibles incidencias de los SAF con *H. brasiliensis* en las condiciones químicas de los suelos ácidos de la región amazónica.

Por ello, el objetivo de esta investigación fue evaluar los posibles efectos de cinco tipos de uso del suelo sobre las propiedades químicas de los horizontes A y B en suelos de lomerío de la Amazonia colombiana: sistema agroforestal de *H. brasiliensis* con maderables y frutales, sistema agroforestal de *H. brasiliensis* asociado a rastrojo, monocultivo de *H. brasiliensis*, bosque secundario como control positivo y pastura nativa como control negativo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en plantaciones de *H. brasiliensis* (caucho), pasturas nativas y bosques secundarios localizados establecidos en suelos de lomas o colinas al interior del paisaje de lomerío, en el área rural de los Municipios Belén de los Andaquíes, Florencia y El Doncello, en el departamento de Caquetá, Colombia. La región se caracteriza por presentar una temperatura media mensual de 24,8°C, evaporación de 88,4 mm, humedad relativa media del 87,1 %, brillo solar promedio de 121 h y precipitaciones de 280,4 mm (IGAC, 2014).



Se colectaron muestras de suelos de las siguientes coberturas:

- Bosque secundario (Bs): bosque mayor de 30 años, con especies nativas, desarrollados por descanso de áreas intervenidas; fue el control positivo en la investigación.
- Sistema agroforestal con *H. brasiliensis*, frutales y/o frutales (Saf): los sistemas agroforestales fueron establecidos a partir de plantaciones de *H. brasiliensis* (clon FX3864) con más de 20 años de cultivo. Estas plantaciones se encontraban en fase de producción y dispuestas en surcos de 4 m entre plantas y 7 m entre calles. Durante los últimos tres años, se fertilizó el caucho anualmente con cal dolomita (500 g árbol<sup>-1</sup>) y Remital® (500 g árbol<sup>-1</sup>). Entre las calles se plantaron especies frutales como *Bactris gasipaes* Kunth (chontaduro), *Theobroma cacao* L. (cacao común), *Theobroma grandiflorum* W.S (copoazú), *Psidium guajava* L. (guayaba), *Eugenia stipitata* M.V (arazá), *Citrus sp.* (cítricos), *Borojoa patinoi* C. (borojó), *Pourouma cecropiifolia* M. (uva caimaroná) e *Ingas sp.* (guamos). Además de especies maderables como *Laurus nobilis* L. (laurel), *Cariniana pyriformis* M. (abarco), *Couma macrocarpa* B.R. (perillo), *Trattinnickia burserifolia* M. (caraño) y *Luma apiculata* D. B. (arrayán).
- Sistema Agroforestal con *H. brasiliensis* y rastrojo (Sar): plantación de *H. brasiliensis* (clon FX3864) con más de 20 años de establecidas a partir de pastura nativa, en fase de producción y dispuesta en surcos de 4 m entre plantas y 7 m entre calles. Los productores realizaron prácticas de limpieza con guadañadora y machete en los surcos, pero dejaron cubiertas las calles con rastrojo en donde predominaban las especies propias de la regeneración natural en la zona: *Miconia sp.* (chilco), *Cecropia membranacea* T. (yarumo), *Piper arboreum* A. (cordoncillo), *Vismia brasiliensis* C. (lacre), *Arundo donax* L. (carrizo), *Clidemia hirta* L.D. (azulejo), y *Bellusia grossularoides* (guayabo coronillo).
- *H. brasiliensis* en monocultivo (Mhe): plantación de *H. brasiliensis* Muell (clon FX3864) con más de 20 años de establecida a partir de pastura nativa, en fase de producción y dispuesta en surcos de 4 m entre plantas y 7 m entre calles. Durante los últimos



tres años se ha fertilizado con cal dolomita ( $500 \text{ g árbol}^{-1}$ ) y  $500 \text{ g árbol}^{-1}$  de Remital®. Estas plantaciones continúan soportando carga animal que pastorea la grama nativa.

- Pastura nativa (Pna): potreros con más de 30 años de establecidos, conformados principalmente por *Paspalum notatum* F. (grama dulce) y *Homolepis aturensis* K. C. (guaduilla), con carga permanente de ganado bovino y equino; presentan niveles de erosión entre fuerte (terracetas, surcos) y extremadamente fuerte (cárcavas y remoción en masa).

Estas pasturas representan el control negativo de la investigación, presentan pérdidas significativas en los atributos del suelo y la pastura, que pueden indicar evidentes procesos de degradación (Dias *et al.*, 2020).

En cada una de las cinco coberturas y en cada horizonte (A y B), cada cinco metros de distancia en dirección opuesta a la pendiente, se tomaron cinco submuestras para conformar una muestra compuesta de aproximadamente 500 g. El horizonte B se muestreó hasta 40 cm, de acuerdo con lo establecido por Cherubin *et al.* (2017), quienes afirman que la actividad de la raíz en suelos arcillosos, como los predominantes en los lomeríos de la Amazonia, es superficial debido, entre otros factores, a la compactación, lo que dificulta la absorción de nutrientes en horizontes subsuperficiales. Las muestras fueron enviadas al laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para el respectivo análisis químico (Tabla 1).





**Tabla 1.** - Métodos utilizados para la determinación de las variables químicas de suelo (Zamudio et al., 2006)

Característica	Método
pH	Potenciómetro en relación agua:suelo 1:1.
Aluminio intercambiable (cmol kg <sup>-1</sup> )	Extracción en KCl
Carbono orgánico (%)	Walkley-Black.
Potasio (cmol kg <sup>-1</sup> )	Extracción con acetato de amonio 1N y neutro.
Fósforo disponible (ppm)	Bray II modificado
Calcio (cmol kg <sup>-1</sup> )	Extracción con acetato de amonio 1N y neutro.
Magnesio (cmol kg <sup>-1</sup> )	Extracción con acetato de amonio 1N y neutro.
Bases Intercambiables (%)	Relación de bases y aluminio.
CIC (cmol kg <sup>-1</sup> )	Extracción con acetato de amonio 1N y neutro.

Los efectos y las interacciones de los tratamientos fueron evaluados en el suelo de cada los horizontes (A y B), mediante un diseño de bloques completos al azar, donde las coberturas correspondieron al factor A, los horizontes al factor B y las zonas de estudio (El Doncello, Florencia y Belén de los Andaquíes) a los bloques. Para evaluar estadísticamente los efectos y las interacciones de los tratamientos, se realizó un análisis de varianza y las medias fueron separadas mediante la prueba de DGC.

Se determinó la similitud entre variables químicas del suelo según la cobertura y el horizonte de muestreo mediante un análisis de conglomerados. Se realizó un análisis de correlaciones entre variables mediante la prueba de Pearson. Finalmente, se realizó un análisis discriminante para la identificación de las variables químicas del suelo de mayor peso estadístico en la separación de coberturas y conglomerados. Todos los análisis estadísticos se corrieron utilizando el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2018).



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza evidenció efectos significativos de las coberturas solamente en el pH del suelo, mientras que CO, P, Ca, Mg y K se vieron afectadas por el horizonte. El contenido de aluminio intercambiable, la CIC y la SB del suelo no se vieron afectados por los tratamientos. Del mismo modo, no se evidenciaron interacciones entre los factores evaluados (Tabla 2).

Los suelos de las cinco coberturas evaluadas presentaron pH extremadamente ácidos producto del material de origen, de las altas precipitaciones en la zona y el lavado de las bases (Ca, Mg, K y Na) que hace que predominen los iones de  $H^+$  y  $Al^{3+}$  (Agegnehu *et al.*, 2021). Estas condiciones de baja fertilidad química resultan normales para estos suelos de la Amazonia colombiana (Rosas *et al.*, 2017), aunque se aprecia un cambio positivo en el suelo bajo los tipos de uso que han recibido enmiendas calcáreas y fertilizantes.

Los suelos de Bs y Sar presentaron niveles de pH más bajo; por su parte, los suelos de Mhe y Saf presentaron mayor pH. Esto pudiera deberse a la incorporación de cal dolomita y estiércol de ganado en pastoreo que regula los niveles de acidez originada por la presencia de aluminio (Rosas *et al.*, 2019; Cervantes *et al.*, 2022). Por otro lado, la descomposición de hojarasca en el bosque puede generar pH bajos por la ausencia de calcio en la biomasa dando origen a un humus ácido (Tanikawa *et al.*, 2018). La pastura también presentó mayor valor de pH que Bs y Sar posiblemente debido al aporte de bases provenientes del estiércol del ganado. Resultados similares reporta Rayne y Aula, (2020) quienes mediante la aplicación de estiércol bovino al suelo incrementaron el valor de pH y la disponibilidad de bases en el suelo (Tabla 2).



**Tabla 2.** - Análisis de varianza entre las diferentes variables en los usos del suelo bajo cada uno de los horizontes

Uso de suelo	Horizonte	Resumen	pH	Al (cmol kg <sup>-1</sup> )	CO (%)	P (ppm)	Ca (cmol kg <sup>-1</sup> )	Mg (cmol kg <sup>-1</sup> )	K (cmol kg <sup>-1</sup> )	SB (%)	CIC (cmol kg <sup>-1</sup> )
Bs	A	Media	3,63 <sup>b</sup>	5,27	2,57 <sup>a</sup>	7,9 <sup>a</sup>	0,23 <sup>a</sup>	0,15 <sup>a</sup>	0,17 <sup>a</sup>	4,40	14,77
		E.E.	0,07	2,47	0,66	1,32	0,06	0,04	0,04	0,60	5,11
	B	Media	3,97 <sup>b</sup>	4,90	0,97 <sup>b</sup>	3,4 <sup>b</sup>	0,06 <sup>b</sup>	0,05 <sup>b</sup>	0,13 <sup>b</sup>	3,60	12,20
		E.E.	0,07	2,47	0,20	1,73	0,02	0,01	0,04	1,42	5,56
Mhe	A	Media	4,33 <sup>a</sup>	3,10	1,8 <sup>a</sup>	7,6 <sup>a</sup>	0,7 <sup>a</sup>	0,42 <sup>a</sup>	0,22 <sup>a</sup>	10,73	13,67
		E.E.	0,15	0,57	0,12	1,45	0,25	0,18	0,06	3,76	1,45
	B	Media	4,1 <sup>a</sup>	5,33	0,88 <sup>b</sup>	2,67 <sup>b</sup>	0,17 <sup>b</sup>	0,09 <sup>b</sup>	0,13 <sup>b</sup>	3,70	11,33
		E.E.	0,06	1,11	0,03 <sup>b</sup>	1,01	0,07	0,02	0,05	0,95	1,12
Pna	A	Media	4,27 <sup>a</sup>	4,10	1,83 <sup>a</sup>	6,37 <sup>a</sup>	0,67 <sup>a</sup>	0,32 <sup>a</sup>	0,23 <sup>a</sup>	9,00	14,60
		E.E.	0,03	0,82	0,13	3,31	0,22	0,19	0,03	3,40	1,76
	B	Media	4,2 <sup>a</sup>	5,60	0,82 <sup>b</sup>	1,64 <sup>b</sup>	0,44 <sup>b</sup>	0,13 <sup>b</sup>	0,16 <sup>b</sup>	5,73	13,40
		E.E.	0,06	1,47	0,09	1,06	0,12	0,06	0,03	1,19	2,17
Saf	A	Media	4,4 <sup>a</sup>	2,98	1,89 <sup>a</sup>	9,97 <sup>a</sup>	0,73 <sup>a</sup>	0,22 <sup>a</sup>	0,15 <sup>a</sup>	24,97	11,37
		E.E.	0,35	1,47	0,51	7,83	0,54	0,10	0,04	21,47	4,00
	B	Media	4,13 <sup>a</sup>	3,00	0,83 <sup>b</sup>	14,13 <sup>a</sup>	0,31 <sup>b</sup>	0,08 <sup>b</sup>	0,08 <sup>b</sup>	18,43	9,17
		E.E.	0,20	1,42	0,24	9,64	0,20	0,03	0,01	16,04	3,78
Sar	A	Media	3,93 <sup>b</sup>	4,07	1,87 <sup>a</sup>	13,4 <sup>a</sup>	0,23 <sup>a</sup>	0,19 <sup>a</sup>	0,16 <sup>a</sup>	6,23	12,70
		E.E.	0,03	1,23	0,43	10,04	0,11	0,08	0,03	2,83	3,65
	B	Media	3,97 <sup>b</sup>	5,20	0,83 <sup>b</sup>	1,8 <sup>b</sup>	0,07 <sup>b</sup>	0,09 <sup>b</sup>	0,11 <sup>b</sup>	2,83	12,23
		E.E.	0,03	1,76	0,06	1,21	0,02	0,04	0,02	0,66	3,80
P-valor	US		0,013	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	H		NS	NS	<0,0001	0,0126	0,0402	0,0116	0,0129	NS	NS
	US x H		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Bs: Bosque secundario; Mhe: Monocultivo de *H. brasiliensis*; Pna: Pastura nativa; Saf: Sistema Agroforestal de *H. brasiliensis* con frutales; Sar: Sistema Agroforestal de *H. brasiliensis* con rastrojo; CO: Carbono orgánico del suelo; SB: Saturación de bases; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; US: Uso del suelo; H: Horizonte  
 NS: No significativo. Medias con letra desiguales expresan diferencias significativas ( $P > 0,05$ )

Las diferencias del CO entre horizontes ( $P < 0,0001$ ) se presentaron se pueden explicar debido a que las raíces de las plantas en los suelos de la Amazonia predominan en la capa superficial del suelo (Rosas *et al.*, 2019) y a que, en los horizontes minerales, los altos contenidos de arcillas y minerales inorgánicos amorfos dificultan la translocación de la materia orgánica a



horizontes subsuperficiales (Gross y Harrison, 2019). Del mismo modo, se presentaron diferencias estadísticas en los contenidos de P ( $P < 0,0126$ ), Ca ( $P < 0,0402$ ), Mg ( $P < 0,0116$ ) K ( $P < 0,0129$ ) debido a que la materia orgánica de H-A es la principal fuente de minerales de los suelos tropicales cultivados con caucho (Zhu *et al.*, 2022); como era de esperarse, estas variables presentaron mayores valores en H-A (Tabla 2) dado que los nutrientes disponibles suelen hallarse en mayor concentración en el horizonte A que en el B (Gross y Harrison, 2019).

A pesar de que Bs presentó el mayor promedio de CO debido a que almacenan grandes cantidades de CO en la hojarasca que conforma el suelo, no fue estadísticamente diferente a las coberturas con leñosas perennes en SAF (Tabla 2). Lo anterior puede deberse a que para el establecimiento de los sistemas de caucho se realizó tumba y quema del bosque lo que ocasionó un aumento significativo en el carbono del suelo (Ollinaho y Kröger, 2021).

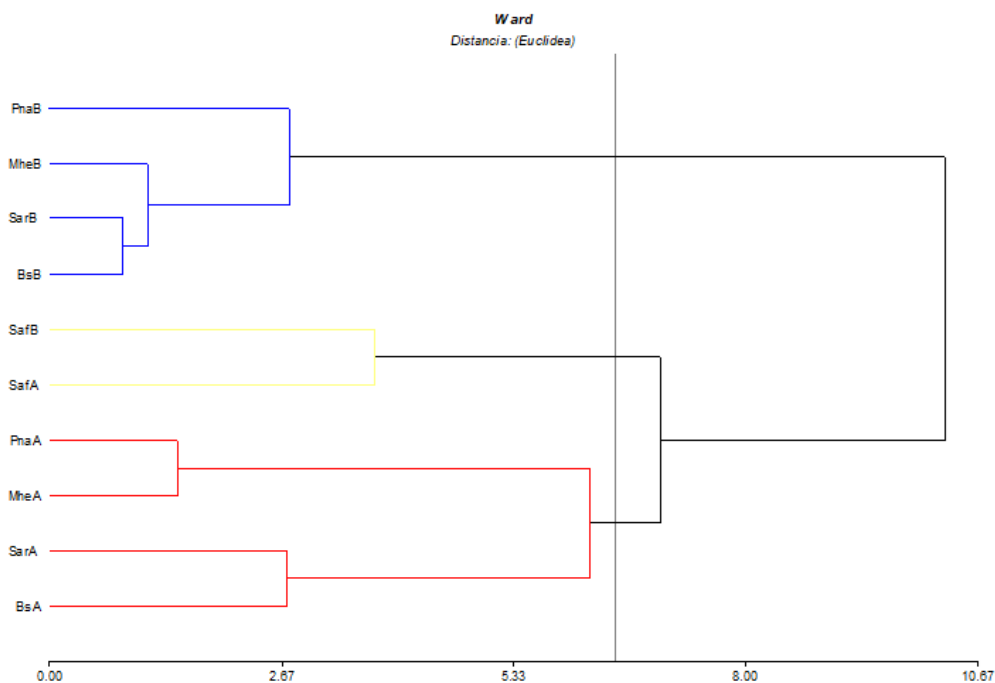
En Saf se encontraron mayores valores que P en H-B (Tabla 2), los altos contenidos de humedad y las temperaturas de los Saf favorecen la dinámica del P en el suelo (Han *et al.*, 2020). Es probable que el incremento del pH debido a la adición de cal dolomita libere el fósforo adsorbido por los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio de estos suelos ácidos (Barrow y Hartemink, 2023) y luego es acomplejado por la materia orgánica y absorbido por los microorganismos que lo convierten en fósforo orgánico fácilmente soluble (Melo *et al.*, 2017; Omenda *et al.*, 2021).

En el caso del K, se presentaron mayores contenidos en Pna y Mhe (Tabla 2), esto posiblemente debido a la incorporación de estiércol de bovinos en pastoreo que incrementa el contenido de K en el suelo, aunque su contenido disminuye en el estiércol luego de dos meses debido a su alta solubilidad (Carpinelli *et al.*, 2020), el pastoreo constante mantiene los aportes de K al suelo.

Como era de esperarse, Ca y Mg presentaron mayores niveles en las coberturas en donde se incorporó cal dolomita (Rosas *et al.*, 2017). Sin embargo, los contenidos de Ca y Mg en pastura se encontraron por encima de los reportados por Bs y Sar (Tabla 2) por efecto posiblemente del estiércol del ganado (Cervantes *et al.*, 2022).



El análisis de clúster también evidenció similitudes estadísticas entre las tipologías de uso de suelo (Figura 1). Las variables químicas presentaron diferencias significativas ( $P < 0,0001$ ) entre los horizontes debido a que los suelos de lomerío en la Amazonia son ácidos y los escasos nutrientes que posee se encuentran en su mayoría en los horizontes superficiales (Zhu *et al.*, 2022). En los cluster se encontró la tendencia de agrupación por perfiles de suelo, exceptuando al Saf en donde H-A y H-B fueron estadísticamente similares posiblemente generado por la fertilización que desde hace tres años se realiza en este sistema con cal dolomita y Remital® y por el efecto de las raíces de las leñosas sobre la estructura del suelo que facilita el ciclo biogeoquímico y movimiento de nutrientes entre los horizontes del suelo (Germon *et al.*, 2020).



**Figura 1.** - Dendrograma con tipología de uso de suelo enfocado a las condiciones químicas en suelos de lomerío de la región amazónica. Bs: Bosque secundario; Mhe: Monocultivo de *H. brasiliensis*; Pna: Pastura nativa; Saf: Sistema Agroforestal de *H. brasiliensis* con frutales; Sar: Sistema Agroforestal de *H. brasiliensis* con rastrojo; A: Horizonte A; B: Horizonte B.



### *Análisis de correlación entre las variables químicas*

En H-A y H-B el pH, se correlacionó positivamente con Ca, Mg y SB aunque la correlación en H-B con Mg no fue significativa (Tablas 3 y 4); lo anterior debido a que al disminuir la acidez ( $H^+$  y  $Al^{3+}$ ) aumenta la presencia de las bases (Hartemink y Barrow, 2023). El pH en H-B también se correlacionó de manera positiva con P y negativa con CO (Tabla 4). En suelos ácidos el incremento del pH aumenta el fósforo disponible y mejora las condiciones para la mineralización del carbono y la formación de compuestos organominerales (Rosas et al., 2017; Buthelezi *et al.*, 2022).

El aluminio en H-A presentó fuerte correlación positiva con CO (Tabla 3), debido a la habilidad del aluminio para formar complejos organominerales (carbono orgánico-aluminio) en condiciones de bajo pH. Sin embargo, en horizontes superficiales de los suelos tropicales, los procesos pedogenéticos intensos y los cambios de pH pueden hacer que estos complejos organominerales sean una fuente constante de  $Al^{3+}$  a la solución del suelo (Wagai et al., 2020). El aluminio también registró fuerte correlación con la CIC para los dos horizontes (Tablas 3 y 4) debido a que en suelos ácidos el aluminio intercambiable es el catión más abundante en la zona de intercambio pues aporta entre el 21 y el 44% de la CIC (Solly *et al.*, 2020).

El CO presentó correlación negativa con P y SB (Tablas 3 y 4), Fonte *et al.* (2014) considera que lo anterior puede deberse a que en suelos ácidos de la Amazonia el fósforo se encuentre mayoritariamente en forma orgánica y no en solución.



**Tabla 3.** - Correlaciones de Pearson entre las variables químicas H-A en diferentes usos del suelo en la Amazonia colombiana

	pH	Al	CO	P	Ca	Mg	K	SB	CIC
pH	1								
Al	-0,45	1							
CO	-0,48	0,85**	1						
P	0,25	-0,46	-0,58*	1					
Ca	0,88**	-0,4	-0,5	0,5	1				
Mg	0,59*	-0,11	-0,17	0,14	0,72	1			
K	0,02	0,5	0,43	-0,37	-0,00071	0,34	1		
SB	0,79**	-0,52	-0,54*	0,6*	0,88*	0,41	-0,31	1	
CIC	-0,34	0,88**	0,86**	-0,7*	-0,45**	-0,08	0,47	-0,6	1

\*Correlación significativa al  $P < 0,05$ ; \*\*Correlación significativa al  $P < 0,0001$ .

El fósforo se correlacionó positivamente con la SB y negativamente con CIC en los dos horizontes (Tablas 3 y 4), también se encontró relación positiva entre P y Ca en H-B. Lo anterior resulta normal para suelos ácidos (Tablas 3 y 4). En estos suelos, la adición de bases mediante materiales encalantes facilita la desorción de P (Rosas *et al.*, 2017). La correlación negativa entre P y CIC puede obedecer a que P presenta carga negativa (es un anión), luego el incremento de CIC y bases mediante aplicaciones de cal puede generar cambios en los coloides del suelo de carga variable y facilitar la lixiviación de P hasta ocasionar agotamiento de las reservas naturales del suelo (Getahun *et al.*, 2021; Tiehcer *et al.*, 2023).

El Ca se presentó correlación positiva con SB y negativa con CIC en los dos horizontes, pero la relación con CIC no resultó significativa en H-B. La adición de materiales encalantes aumenta la saturación de bases en horizontes superficiales (Ejigu *et al.*, 2023). Sin embargo, en estos suelos arcillosos la translocación de estas bases a horizontes subsuperficiales es limitada (Antonangelo *et al.*, 2022). En estos suelos con alto contenidos de aluminio ( $>3,6$  cmol  $\text{kg}^{-1}$ ), es probable que la relación negativa entre Ca y CIC esté influenciada por la saturación del aluminio intercambiable y en solución (Aramburu *et al.*, 2023).



**Tabla 4.** - Análisis de correlación entre las variables químicas del H-B en diferentes usos del suelo en la Amazonia colombiana

	pH	Al	CO	P	Ca	Mg	K	SB	CIC
pH	1								
Al	-2,60E-03	1							
CO	-0,58*	0,21	1						
P	0,58*	-0,55*	-0,58*	1					
Ca	0,75*	-0,04	-0,57*	0,58*	1				
Mg	0,54	0,37	-0,27	0,2	0,56*	1			
K	0,15	0,62*	0,28	-0,27	0,26	0,55*	1		
SB	0,68*	-0,48	-0,64*	0,97**	0,69*	0,29	-0,2	1	
CIC	-0,09	0,93**	0,42	-0,6*	-0,16	0,2	0,51	-0,54*	1

\*Correlación significativa al  $P < 0,05$ ; \*\*Correlación significativa al  $p < 0,0001$ .

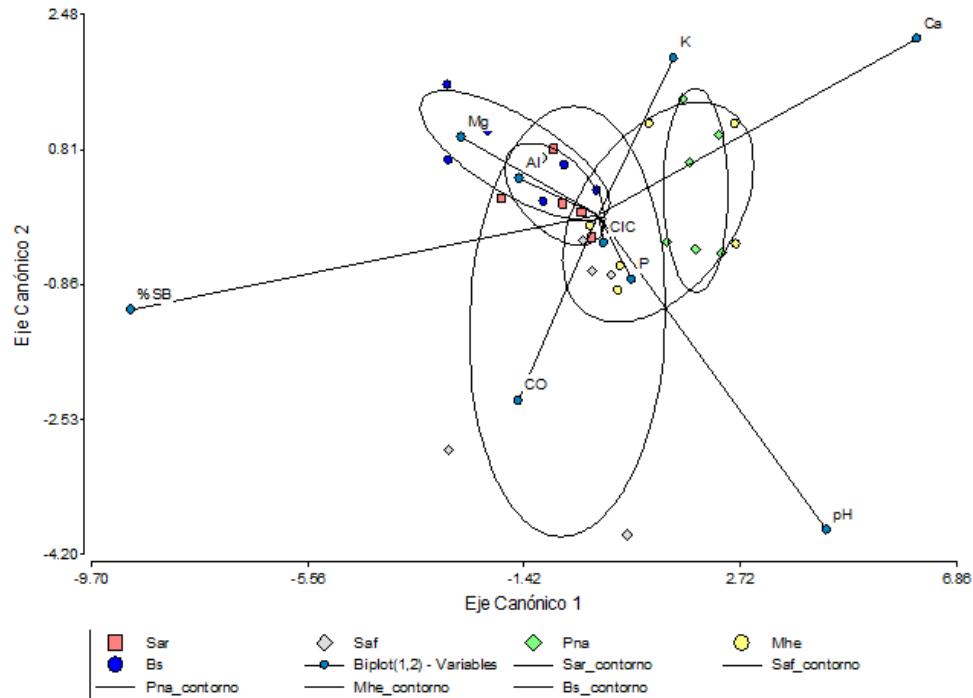
*Similitudes entre coberturas de H. brasieleinsis con el control positivo y el negativo*

Referente a las observaciones multivariadas en el espacio discriminante de los cinco tipos de cobertura (Figura 2), se evidencian similitudes soportadas en los ejes canónicos 1 y 2, entre algunas coberturas. Bs, Sar y Saf presentaron superposición de sus elipsoides por interacción de la variable SB y CO; por otro lado, Mhe y Pna mostraron similitudes entre sí gracias a los valores de Ca y K principalmente. Existen contrastes entre el control positivo (Bs) y el control negativo (Pna), mientras que los sistemas agroforestales de *H. brasiliensis* (Sar y Saf) presentan comportamientos más parecidos al control positivo, sin embargo, es necesario mencionar que la incorporación de bases a partir de enmiendas, fueron determinantes en el comportamiento de las propiedades químicas de los suelos.

Estas diferencias en cantidades de nutrientes del suelo evidenciadas entre coberturas coinciden con lo reportado por Figueroa *et al.* (2020) quienes afirman que los cambios en el uso de la tierra alteran la dinámica y el contenido de C, N y P del suelo, con posibles consecuencias negativas para la sostenibilidad de los sistemas de producción ganadera en las regiones tropicales. Por esta razón los agroecosistemas con caucho son una alternativa de uso sostenible del suelo, en la región amazónica, el árbol resulta un componente esencial en los sistemas productivos.







**Figura 2.** - Representación de observaciones multivariadas en cinco usos del suelo, definidos a priori, en el espacio discriminante conformado por los ejes canónicos 1 y 2 del AD, Contornos corresponden a elipses de predicción.

## CONCLUSIONES

Los suelos bajo cobertura de sistemas agroforestales de *Hevea brasiliensis* muestran similitudes en sus propiedades químicas con los suelos del bosque amazónico, mientras que el monocultivo de *H. brasiliensis* presenta mayor similitud con la pastura degradada. Se evidencia que el tipo de uso tiene efectos significativos en el pH del suelo, especialmente en el horizonte A, debido a la adición de insumos agrícolas, más que por la acción del árbol en sí mismo.



Las características químicas (excepto el pH) de los suelos parecen no verse influenciadas por la presencia de *H. brasiliensis* establecido en monocultivo o en sistemas agroforestales. En contraste, tanto el bosque y como los sistemas asociados al rastrojo conservan las condiciones ácidas propias de los suelos amazónicos.

**Agradecimientos:** los autores expresan su agradecimiento a la Asociación de Reforestadores y Cultivadores de Caucho del Caquetá ASOHECA.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEGNEHU, G., AMEDE, T., ERKOSSA, T., YIRGA, C., HENRY, C., TYLER, R., NOSWORTHY, M.G., BEYENE, S. y SILESHI, G.W., 2021. Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B Soil & Plant Science* [en línea], vol. 71, no. 9, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 0906-4710. DOI 10.1080/09064710.2021.1954239. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239>.

ANTONANGELO, J.A., NETO, J.F., CRUSCIOL, C.A.C., ZHANG, H. y ALLEONI, L.R.F., 2022. Lime and calcium-magnesium silicate cause chemical attributes stratification in no-till fields. *Soil and Tillage Research* [en línea], vol. 224, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 0167-1987. DOI 10.1016/j.still.2022.105522. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198722002082>.

ARAMBURU MERLOS, F., SILVA, J.V., BAUDRON, F. y HIJMANS, R.J., 2023. Estimating lime requirements for tropical soils: Model comparison and development. *Geoderma* [en línea], vol. 432, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 0016-7061. DOI 10.1016/j.geoderma.2023.116421. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706123000988>.



BARROW, N.J. y HARTEMINK, A.E., 2023. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant and Soil* [en línea], vol. 487, no. 1, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 1573-5036. DOI 10.1007/s11104-023-05960-5. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>.

BUTHELEZI, K. y BUTHELEZI-DUBE, N., 2022. Effects of long-term (70 years) nitrogen fertilization and liming on carbon storage in water-stable aggregates of a semi-arid grassland soil. *Heliyon* [en línea], vol. 8, no. 1, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2405-8440. DOI 10.1016/j.heliyon.2021.e08690. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021027936>.

CARPINELLI, S., FONSECA, A., WEIRICH NETO, P., DIAS, S.H. y PONTES, L., 2020. Spatial and Temporal Distribution of Cattle Dung and Nutrient Cycling in Integrated CropLivestock Systems. *Agronomy* [en línea], vol. 10, no. 5, DOI 10.3390/agronomy10050672. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/341302105\\_Spatial\\_and\\_Temporal\\_Distribution\\_of\\_Cattle\\_Dung\\_and\\_Nutrient\\_Cycling\\_in\\_Integrated\\_Crop\\_Livestock\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/341302105_Spatial_and_Temporal_Distribution_of_Cattle_Dung_and_Nutrient_Cycling_in_Integrated_Crop_Livestock_Systems).

CELENTANO, D., ROUSSEAU, G.X., PAIXÃO, L.S., LOURENÇO, F., CARDOZO, E.G., RODRIGUES, T.O., E SILVA, H.R., MEDINA, J., DE SOUSA, T.M.C., ROCHA, A.E. y DE OLIVEIRA REIS, F., 2020. Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. *Agroforestry Systems* [en línea], vol. 94, no. 5, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 1572-9680. DOI 10.1007/s10457-020-00496-4. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00496-4>.

CERVANTES-VÁZQUEZ, T.J.Á., PRECIADO-RANGEL, P., FORTIS-HERNÁNDEZ, M., VALENZUELA-GARCÍA, A.A., GARCÍA-HERNÁNDEZ, J.L. y CERVANTES-VÁZQUEZ, M.G., 2022. Efectos en el suelo por la aplicación de estiércol bovino y vermicompost, en el cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*). *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA* [en línea], vol. 40, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2395-8030. DOI



- 10.28940/terra.v40i0.835. Disponible en:  
<https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/835>.
- CHERUBIN, M.R., TORMENA, C.A. y KARLEN, D.L., 2017. Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [en línea], vol. 41, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 1806-9657. DOI 10.1590/18069657rbc20160148. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rbc/a/64Qbv5rvGR9c38dMmjR9vmx/?lang=en>.
- DI RIENZO, J.A., CASANOVES, F., BALZARINI, M.G., GONZALEZ, L. y ROBLEDO, CW., 2018. *InfoStat. Centro de Transferencia InfoStat, FCA*,. 2018. S.l.: Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- DIAS BATISTA, P.H., PONTES DE ALMEIDA, G.L., BEZERRA DA SILVA, J.L., PANDORFI, H., VINÍCIUS DA SILVA, M., BATISTA DA SILVA, R.A., NEVES DE MELO, M.V., ABRAÃO COSTA LINS, F., FLORENTINO CORDEIRO JUNIOR, J.J., DIAS BATISTA, P.H., PONTES DE ALMEIDA, G.L., BEZERRA DA SILVA, J.L., PANDORFI, H., VINÍCIUS DA SILVA, M., BATISTA DA SILVA, R.A., NEVES DE MELO, M.V., ABRAÃO COSTA LINS, F. y FLORENTINO CORDEIRO JUNIOR, J.J., 2020. Short-term grazing and its impacts on soil and pasture degradation. *DYNA* [en línea], vol. 87, no. 213, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 0012-7353. DOI 10.15446/dyna.v87n213.81853. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0012-73532020000200123&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0012-73532020000200123&lng=en&nrm=iso&tlng=en).
- EJIGU, W., SELASSIE, Y.G., ELIAS, E. y MOLLA, E., 2023. Effect of lime rates and method of application on soil properties of acidic Luvisols and wheat (*Triticum aestivum*, L.) yields in northwest Ethiopia. *Heliyon* [en línea], vol. 9, no. 3, ISSN 2405-8440. DOI 10.1016/j.heliyon.2023.e13988. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36873481/>.



FIGUEROA, D., ORTEGA-FERNÁNDEZ, P., ABBRUZZINI, T.F., RIVERO-VILLAR, A., GALINDO, F., CHAVEZ-VERGARA, B., ETCHEVERS, J.D. y CAMPO, J., 2020. Effects of Land Use Change from Natural Forest to Livestock on Soil C, N and P Dynamics along a Rainfall Gradient in Mexico. *Sustainability* [en línea], vol. 12, no. 20, [consulta: 22 julio 2024]. Disponible en: <https://ideas.repec.org//a/gam/jsusta/v12y2020i20p8656-d431124.html>.

FONTE, S.J., NESPER, M., HEGGLIN, D., VELÁSQUEZ, J.E., RAMIREZ, B., RAO, I.M., BERNASCONI, S.M., BÜNEMANN, E.K., FROSSARD, E. y OBERSON, A., 2014. Pasture degradation impacts soil phosphorus storage via changes to aggregate-associated soil organic matter in highly weathered tropical soils. *Soil Biology and Biochemistry* [en línea], vol. 68, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 0038-0717. DOI 10.1016/j.soilbio.2013.09.025. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003807171300326X>.

FRANCO, A.L.C., SOBRAL, B.W., SILVA, A.L.C. y WALL, D.H., 2019. Amazonian deforestation and soil biodiversity. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, vol. 33, no. 3, ISSN 1523-1739. DOI 10.1111/cobi.13234.

GERMON, A., LACLAU, J.-P., ROBIN, A. y JOURDAN, C., 2020. Tamm Review: Deep fine roots in forest ecosystems: Why dig deeper? *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 466, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 0378-1127. DOI 10.1016/j.foreco.2020.118135. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112720302486>.

GETAHUN, G.T., ETANA, A., MUNKHOLM, L.J. y KIRCHMANN, H., 2021. Liming with CaCO<sub>3</sub> or CaO affects aggregate stability and dissolved reactive phosphorus in a heavy clay subsoil. *Soil and Tillage Research* [en línea], vol. 214, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 0167-1987. DOI 10.1016/j.still.2021.105162. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719872100235X>.



GROSS, C. y HARRISON, R., 2019. The Case for Digging Deeper: Soil Organic Carbon Storage, Dynamics, and Controls in Our Changing World. *Soil Syst* [en línea], vol. 3, no. 28, DOI 10.3390/soilsystems3020028. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2571-8789/3/2/28>.

HAILEGNAW, N.S., MERCL, F., PRAÈKE, K., SZÁKOVÁ, J. y TLUSTOŠ, P., 2019. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments* [en línea], vol. 19, no. 5, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 1614-7480. DOI 10.1007/s11368-019-02264-z. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02264-z>.

HAN, T., REN, H., HUI, D., WANG, J., LU, H. y LIU, Z., 2020. Light availability, soil phosphorus and different nitrogen forms negatively affect the functional diversity of subtropical forests. *Global Ecology and Conservation* [en línea], vol. 24, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2351-9894. DOI 10.1016/j.gecco.2020.e01334. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989420308751>.

HARTEMINK, A.E. y BARROW, N.J., 2023. Soil pH - nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil* [en línea], vol. 486, no. 1, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 1573-5036. DOI 10.1007/s11104-022-05861-z. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC)., 2014. *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras: Departamento de Caquetá. Escala 1:100.000*. 2014. S.l.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC): Bogotá, Colombia.

JOSEPH, P., JESSY, M.D. y MOHAN, M., 2022. Soil carbon pools under rubber (*Hevea brasiliensis*) based agroforestry systems in South India. *Agroforestry Systems* [en línea], vol. 96, no. 8, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 1572-9680. DOI 10.1007/s10457-022-00770-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00770-7>.





- MURAD, C.A. y PEARSE, J., 2018. Landsat study of deforestation in the Amazon region of Colombia: Departments of Caquetá and Putumayo. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* [en línea], vol. 11, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2352-9385. DOI 10.1016/j.rsase.2018.07.003. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938518301678>.
- NAIR, P.K.R., KUMAR, B.M. y NAIR, V.D., 1985. Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* [en línea], vol. 3, no. 2, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 1572-9680. DOI 10.1007/BF00122638. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF00122638>.
- OLLINAHO, O.I. y KRÖGER, M., 2021. Agroforestry transitions: The good, the bad and the ugly. *Journal of Rural Studies* [en línea], vol. 82, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 0743-0167. DOI 10.1016/j.jrurstud.2021.01.016. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743016721000164>.
- OMENDA, J.A., NGETICH, K.F., KIBOI, M.N., MUCHERU-MUNA, M.W. y MUGENDI, D.N., 2021. Phosphorus availability and exchangeable aluminum response to phosphate rock and organic inputs in the Central Highlands of Kenya. *Heliyon* [en línea], vol. 7, no. 3, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2405-8440. DOI 10.1016/j.heliyon.2021.e06371. Disponible en: [https://www.cell.com/heliyon/abstract/S2405-8440\(21\)00476-X](https://www.cell.com/heliyon/abstract/S2405-8440(21)00476-X).
- ORRUTÉA, A., MOTTA, A. y TESTONI, S., 2017. Land Use and Changes in Soil Morphology and Physical-Chemical Properties in Southern Amazon. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [en línea], vol. 41, DOI 10.1590/18069657rbc20170034. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170034>.
- PATIÑO, G.R., RAMOS, J.M. y SALAZAR, J.C.S., 2016. Incidencia de sistemas agroforestales con *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. sobre propiedades físicas de suelos de lomerío en el departamento de Caquetá, Colombia. *Acta Agronómica* [en línea], vol. 65, no. 2, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2323-0118. DOI 10.15446/acag.v65n2.45173. Disponible en: [https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta\\_agronomica/article/view/45173](https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/45173).



- PENA-VENEGAS, C., STERLING, A. y ANDRADE, T., 2021. Arbuscular Mycorrhization in Colombian and Introduced Rubber (*Hevea brasiliensis*) Genotypes Cultivated on Degraded Soils of the Amazon Region. *Agriculture* [en línea], vol. 11, no. 4, DOI 10.3390/agriculture11040361. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2077-0472/11/4/361>.
- RAYNE, N. y AULA, L., 2020. Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review. *Soil Systems* [en línea], vol. 4, no. 4, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2571-8789. DOI 10.3390/soilsystems4040064. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2571-8789/4/4/64>.
- ROSAS-PATIÑO, G., PUENTES-PÁRAMO, Y.J. y MENJIVAR-FLORES, J.C., 2017. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* [en línea], vol. 18, no. 3, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2500-5308. DOI 10.21930/rcta.vol18\_num3\_art:742. Disponible en: <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/742>.
- ROSAS-PATIÑO, G., PUENTES-PÁRAMO, Y.J. y MENJIVAR-FLORES, J.C., 2019. Efecto del encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* [en línea], vol. 20, no. 1, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2500-5308. DOI 10.21930/rcta.vol20\_num1\_art:1247. Disponible en: <https://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/1247>.
- SALAZAR, J.C.S., BAUTISTA, E.H.D. y PATIÑO, G.R., 2015. Macrofauna edáfica asociada a sistemas agroforestales en la Amazonia Colombiana. *Acta Agronómica* [en línea], vol. 64, no. 3, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2323-0118. DOI 10.15446/acag.v64n3.38033. Disponible en: [https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta\\_agronomica/article/view/38033](https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/38033).





SANTANA-GONZÁLEZ, Y., SÁNCHEZ-BELL, W., MENA-SÁNCHEZ, R. y DURAND-FROMETA, A., 2022. Potencialidades y limitaciones de aprendizaje en el proyecto agroalimentario "Desde la Familia": Learning potentialities and limitations in the agri-food project "From the Family". *Maestro y Sociedad* [en línea], vol. 19, no. 3, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 1815-4867. Disponible en: <https://maestrosociedad.uo.edu.cu/index.php/MyS/article/view/5680>.

SILESHI, G.W., MAFONGOYA, P.L. y NATH, A.J., 2020. Agroforestry Systems for Improving Nutrient Recycling and Soil Fertility on Degraded Lands. En: J.C. DAGAR, S.R. GUPTA y D. TEKETAY (eds.), *Agroforestry for Degraded Landscapes: Recent Advances and Emerging Challenges - Vol.1* [en línea]. Singapore: Springer, pp. 225-253. [consulta: 22 julio 2024]. ISBN 9789811541360. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-4136-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4136-0_8).

SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL TERRITORIAL DE LA AMAZONIA COLOMBIANA (SIAT-AC)., 2022. *La Amazonia Región Amazónica colombiana. 27 de octubre de 2022*. [en línea]. 2022. S.l.: SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL TERRITORIAL DE LA AMAZONIA COLOMBIANA (SIAT-AC). Disponible en: <https://siatac.co/la-Amazonia-colombiana/>.

SOLLY, E.F., WEBER, V., ZIMMERMANN, S., WALTHERT, L., HAGEDORN, F. y SCHMIDT, M.W.I., 2020. A Critical Evaluation of the Relationship Between the Effective Cation Exchange Capacity and Soil Organic Carbon Content in Swiss Forest Soils. *Frontiers in Forests and Global Change* [en línea], vol. 3, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2624-893X. DOI 10.3389/ffgc.2020.00098. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/forests-and-global-change/articles/10.3389/ffgc.2020.00098/full>.

TANIKAWA, T., FUJII, S., SUN, L., HIRANO, Y., MATSUDA, Y., MIYATANI, K., DOI, R., MIZOGUCHI, T. y MAIE, N., 2018. Leachate from fine root litter is more acidic than leaf litter leachate: A 2.5-year laboratory incubation. *Science of The Total Environment* [en línea], vol. 645, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 0048-9697. DOI



- 10.1016/j.scitotenv.2018.07.038. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718325191>.
- TIECHER, T., FONTOURA, S.M.V., AMBROSINI, V.G., ARAÚJO, E.A., ALVES, L.A., BAYER, C. y GATIBONI, L.C., 2023. Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. *Geoderma* [en línea], vol. 435, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 0016-7061. DOI 10.1016/j.geoderma.2023.116495. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706123001726>.
- WAGAI, R., KAJIURA, M. y ASANO, M., 2020. Iron and aluminum association with microbially processed organic matter via meso-density aggregate formation across soils: organo-metallic glue hypothesis. *SOIL* [en línea], vol. 6, no. 2, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 2199-3971. DOI 10.5194/soil-6-597-2020. Disponible en:  
<https://soil.copernicus.org/articles/6/597/2020/>.
- ZAMUDIO, A., CARRASCAL, C., PULIDO, J., GALLARDO, E., ÁVILA, M., VARGAS, A. y VERA, D., 2006. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* [en línea]. 6ta. S.l.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. ISBN 978-958-9067-98-7. Disponible en:  
[https://books.google.com.cu/books/about/M%C3%A9todos\\_anal%C3%ADticos\\_del\\_laboratorio\\_de.html?id=Zz7eXwAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.cu/books/about/M%C3%A9todos_anal%C3%ADticos_del_laboratorio_de.html?id=Zz7eXwAACAAJ&redir_esc=y).
- ZHU, X., JIANG, X., KUMAR SINGH, A., ZENG, H., CHEN, C., LU, E. y LIU, W., 2022. Reduced litterfall and decomposition alters nutrient cycling following conversion of tropical natural forests to rubber plantations. *Ecological Indicators* [en línea], vol. 138, [consulta: 22 julio 2024]. ISSN 1470-160X. DOI 10.1016/j.ecolind.2022.108819. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X22002904>.



***Conflictos de intereses:***

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

***Contribución de los autores:***

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

