TecnoLógicas

# Abonos verdes: estrategia agroecológica para el manejo sostenible de suelos de clima seco tropical

## Green Manure: An Agroecological Strategy for Sustainable Soil Management in Tropical Dry Climates

Nelson Virgilio Piraneque-Gambasica[1]; Sonia Esperanza Aguirre-Forero[1]; Lida Paola Pinzón-Gómez[1]

[1]Universidad del Magdalena, Santa Marta - Colombia

Correspondencia: npiraneque@unimagdalena.edu.co

**Recibido:** 16 Julio 2025 **Aceptado:** 15 Abril 2026 **Disponible:** 30 Abril 2026

**Cómo citar / How to cite**
N. V. Piraneque-Gambasica, S. E. Aguirre-Forero, and L. P. Pinzón-Gómez, "Abonos verdes: estrategia agroecológica para el manejo sostenible de suelos de clima seco tropical," *TecnoLógicas*, vol. 29, no. 66, e3569, 2026.
https://doi.org/10.22430/22565337.3569

## Resumen

En el Caribe seco colombiano, las condiciones climáticas y el manejo convencional del suelo aumentan su vulnerabilidad a la degradación, lo que exige estrategias que conserven sus funciones y sostenibilidad. La agroecología propone el uso de abonos verdes como alternativa para mejorar la salud del suelo al promover la biodiversidad, aumentar la materia orgánica y brindar protección al reducir el impacto directo de la luz solar y el agua; sin embargo, existe limitada evidencia sobre su efecto en esta región. El objetivo de esta investigación fue caracterizar las propiedades edáficas en 11 municipios de cuatro subregiones del departamento del Magdalena y evaluar su variación temporal tras la siembra e incorporación de abonos verdes. La metodología consistió en el establecimiento de 30 unidades experimentales dispuestas en bloques completos al azar sembrando cuatro especies de abonos verdes (*Phaseolus vulgaris, Crotalaria juncea, Pueraria phaseoloides y Zea mays*). Se evaluaron propiedades del suelo antes y después de la incorporación de biomasa mediante análisis de desviación, modelos lineales generalizados y correlaciones de Pearson. Los resultados no evidenciaron cambios significativos en las propiedades físicas, pero sí en la conductividad eléctrica (CE) ($p = 0{,}002$) tras la incorporación de biomasa. *C. juncea* evidenció mayor producción de biomasa (hasta 69942 kg·ha$^{-1}$) y mayor adaptabilidad en tres de las cuatro subregiones y *P. phaseoloides*, sobresalió en la subregión Río. Se encontraron correlaciones entre el suelo y la biomasa por subregión. Finalmente, se concluye que la incorporación de abonos verdes genera mejoras parciales en las propiedades del suelo. No obstante, la variabilidad espacial de las respuestas sugiere que su efectividad depende de la especie utilizada y de condiciones locales, por lo que se recomienda su implementación continua para lograr cambios sostenidos en el sistema edáfico.

## Palabras clave

Degradación del suelo, fertilidad del suelo, materia orgánica del suelo, producción de biomasa, propiedades del suelo.

## Abstract

In the dry Caribbean of Colombia, the climate and conventional soil management practices increase the soil's vulnerability to degradation, requiring strategies to preserve its functions and long-term sustainability. Agroecology promotes the use of green manures as an alternative to improve soil health by increasing biodiversity, increasing soil organic matter, and providing protection against direct exposure to solar radiation and water; however, evidence of their effects in this region remains limited. The objective of this study was to characterize soil properties in 11 municipalities within four subregions of the Magdalena department and to evaluate their temporal variation following the establishment and incorporation of green manures. The methodology involved establishing 30 experimental units arranged in a complete randomized block design, with four green manure species (*Phaseolus vulgaris, Crotalaria juncea, Pueraria phaseoloides, and Zea mays).* Soil properties were assessed before and after biomass incorporation using variance analysis, generalized linear models, and Pearson's correlation analysis. The results showed no significant changes in physical soil properties; however, electrical conductivity (EC) differed significantly after biomass incorporation ($p = 0.002$). C. juncea demonstrated the highest biomass production (up to 69942 kg $ha^{-1}$) and the greatest adaptability in three of the four subregions, while *P. phaseoloides* performed best in the Río subregion. The analysis identified subregion-specific correlations between soil properties and biomass production. In conclusion, incorporating green manures results in partial improvements in soil properties. However, spatial variability in soil responses suggests that its effectiveness depends on the species used and local conditions, highlighting the need for sustained implementation to achieve long-term improvements in the soil system.

## Keywords

Soil degradation, soil fertility, soil organic matter, biomass production, soil properties.

## 1. INTRODUCCIÓN

El departamento del Magdalena se caracteriza por una amplia diversidad de condiciones edafoclimáticas que favorecen la producción agrícola de múltiples especies. Pese a esto, la expansión de modelos convencionales intensivos genera presión creciente sobre los recursos naturales, especialmente del recurso edáfico, provocando la pérdida de biodiversidad y de materia orgánica, así como la disminución de la fertilidad, junto con la aparición de procesos de compactación, salinización y erosión [1]. Estas condiciones, sumadas a la variabilidad climática, prácticas agrícolas inadecuadas y escasez de recursos, acentúa la vulnerabilidad de los agroecosistemas y la inseguridad alimentaria de los pobladores rurales [2], [3].

Frente a este panorama, los sistemas agroecológicos de producción surgen como alternativa que integra principios ecológicos con prácticas agrícolas orientadas a conservar las funciones edáficas [4]. El uso de compostaje, abonos verdes, bioinsumos, rotación de cultivos y la reducción del uso de agroquímicos, contribuye a mejorar la estructura edáfica e incrementar el contenido de carbono orgánico lo que fortalece procesos biogeoquímicos y aumenta la resiliencia del sistema productivo [5]. Sumado a lo anterior, los sistemas mixtos de producción representan una estrategia para la adaptación al cambio climático, al promover prácticas que reducen emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) o promueven el incremento de carbono en el suelo [6].

El uso de cultivos como abonos verdes es una estrategia ampliamente reconocida para promover la salud y la calidad del suelo, reducir la erosión hídrica y eólica, mejorar las propiedades hidrodinámicas de los suelos, incrementar la diversidad de organismos del suelo e incrementar los contenidos de carbono y nitrógeno en el mismo [6]-[8] Diversos estudios, como los de [4], [9], [10] han documentado efectos positivos de los abonos verdes para la transición agroecológica en regiones tropicales siendo fundamentales para la intensificación sostenible, logrando mejoras significativas en el carbono orgánico del suelo (COS), el nitrógeno total y la estabilidad de agregados den diversos ecosistemas tropicales [11]. Además, fomentan mejoras en la capacidad de intercambio catiónico, pH, disponibilidad de nutrientes y actividad biológica [12].

Al respecto, estudios recientes subrayan que el uso de especies como *C. juncea* no solo rehabilita la fertilidad fisicoquímica, sino que actúa como un modulador biológico, promoviendo comunidades microbianas benéficas (como *Streptomyces spp.*) y suprimiendo

activamente hongos patógenos como *Fusarium y Alternaria* [13], [14]. Sin embargo, la efectividad depende de la dinámica de descomposición: En primer lugar, especies leñosas y ricas en biomasa como la crotalaria, ofrecen una cobertura persistente debido a su contenido de lignina, mientras que otras como los fríjoles, permiten rápida mineralización de nutrientes para el cultivo de sucesión [8], [15]. Segundo, existe una carencia de estudios que utilicen modelos integrados de salud del suelo para evaluar su funcionalidad a largo plazo [15], [16]. En tercer lugar, la sincronización entre liberación de nutrientes y la demanda de los cultivos en condiciones edafoclimáticas tropicales específicas, sigue siendo un desafío poco explorado [14], toda vez que los procesos de meteorización, lixiviación y degradación de materiales parentales se aceleran y afectan significativamente el suelo [5].

En este sentido, [2] subrayan que los suelos del Caribe colombiano, pese a su vulnerabilidad estructural y climática, pueden ser estratégicos en la regulación del carbono orgánico del suelo (COS) si se implementan prácticas agroecológicas sostenibles adaptadas al contexto. Se requiere de investigaciones que permitan avanzar en la comprensión del impacto de las prácticas agroecológicas a nivel edáfico que brinden información técnica para diseñar estrategias de manejo ajustadas a las condiciones del Caribe seco colombiano. La implementación de estos sistemas será necesaria para la promoción de modelos productivos más resilientes y eficientes a mediano y largo plazo. De esta forma, esta investigación busca llenar estos vacíos al evaluar cómo el manejo estratégico de los abonos verdes acelera la recuperación funcional del suelo.

Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue caracterizar las propiedades edáficas en once municipios pertenecientes a cuatro subregiones del departamento del Magdalena y determinar su variación en el tiempo tras la siembra e incorporación de especies de abonos verdes: fríjol (*Phaseolus vulgaris), crotalaria (Crotalaria juncea), kudzú (Pueraria phaseoloides) y maíz (Zea mays*).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Área experimental

El estudio se desarrolló en once municipios que representan la diversidad edafoclimática del departamento del Magdalena: Santa Ana, Guamal, San Sebastián, Ariguaní, Plato, Ciénaga, Zona Bananera, El Piñón, Pivijay, Sitionuevo y Santa Marta (Figura 1). La zona presenta clima cálido seco, con temperatura media anual de 28 °C, precipitación media anual entre 500 mm y 1200 mm con régimen bimodal y evapotranspiración potencial alta (>1500 mm anuales), lo que determina un régimen de humedad del suelo ústico y de temperatura isohipertérmico. Las unidades productivas se localizaron en tres paisajes principales: Lomerío (29,5 % de los predios de la Subregión Centro), piedemonte (7,44 % en la Subregión Norte); montaña (7,44 % en la Subregión Santa Marta), con pendientes superiores a 25 %. El 55,5 % restante, corresponde a planicies aluviales y valles (Subregión Río y Sur), con pendientes inferiores a 3 %. Esta heterogeneidad orográfica se consideró en la selección de parcelas experimentales, ubicándose en áreas representativas de cada paisaje. Cada municipio fue georreferenciado y en cada uno se localizaron tres parcelas. La selección de predios consideró criterios de accesibilidad, disposición del propietario, disponibilidad de servicios básicos y conectividad, el estudio hace parte de un macroproyecto financiado por el Sistema Nacional de Regalías ejecutado por la Universidad del Magdalena durante los años 2018 y 2024.

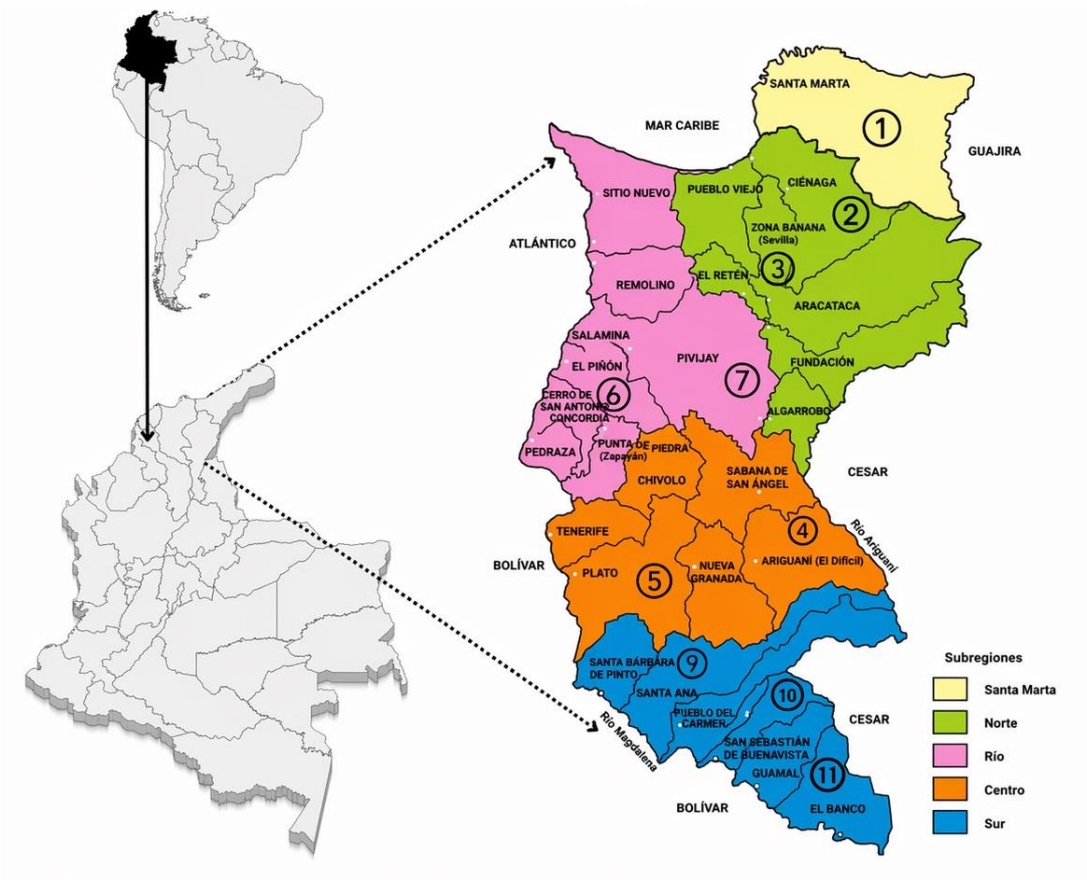



**Figura 1.** Localización zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

### *2.1.1 Caracterización de las zonas y variables respuesta*

En campo se observaron detalladamente geoformas del paisaje y se realizó descripción por sitio. Se escogieron sitios uniformes para montaje de las UP (parcelas) donde se hicieron calicatas para describir el perfil, delimitar horizontes y características edáficas generales. La información general de litología, cobertura, paisaje, clima y relieve se contrastó con la contenida en [17].

Seleccionados los sitios para establecer las parcelas, antes de la siembra, se recolectaron muestras compuestas de suelos de 0–20 cm, las cuales fueron enviadas al laboratorio para determinar propiedades físicas y químicas (Tabla 1). Procedimiento que se repitió 20 días después de la incorporación de abonos verdes, a fin de analizar la variación temporal de las propiedades edáficas.

Previo al corte de las plantas, se cuantificó la biomasa aérea fresca mediante un marco de 0,25 $m^2$ (tres repeticiones por parcela), y luego los datos fueron extrapolados a $kg \cdot ha^{-1}$.

El muestreo 20 días después del corte de las plantas, fue elegido para capturar los efectos inmediatos de la liberación de nutrientes lábiles y los cambios en la solución del suelo, antes de que se presenten pérdidas por lixiviación o volatilización considerando que en las condiciones de la zona de estudio (tropicales secas), la mineralización de los residuos orgánicos es rápida [7], [14] y aunque los cambios en las propiedades físicas pudieran requerir mayores plazos, este periodo permite evaluar la respuesta temprana de indicadores sensibles como la CE y la disponibilidad de nutrientes.

**Tabla 1.** Métodos para determinación de variables físicas y químicas en 33 UPs del departamento del Magdalena. Fuente: elaboración propia.

| Variable | | Unidades | Método |
|---|---|---|---|
| Densidad aparente | DA | $g \cdot cm^{-3}$ | Cilindro |
| Textura | T | % | Análisis directo/ Método de Bouyoucos |
| Saturación de humedad | H | % | Pasta de saturación/ Gravimétrico/ USDA Salinity Laboratory |
| pH | pH | NA | Pasta de saturación/ Conductimétrico/ USDA Salinity Laboratory |
| Conductividad eléctrica | CE | $dS \cdot m^{-1}$ | Pasta de saturación/ Conductimétrico/ USDA Salinity Laboratory |
| Capacidad de intercambio catiónico efectiva | CICe | meq/100g | Cálculo (suma de cationes) |
| Carbono orgánico oxidable | COox | % | Sln. Dicromato de Potasio/ NTC 5403 Walkley-Black |
| Materia orgánica | MO | % | Cálculo |
| Nitrógeno total | NT | % | Calculo |
| Potasio intercambiable | K | meq/100 g | Sln. Acetato de Amonio/ ICP-OES/ NTC 5349 |
| Fosforo | P | $mg \cdot kg^{-1}$ | Sln. Bray II/ Colorimétrico/ NTC 5350 |
| Calcio intercambiable | Ca | meq/100 g | Sln. Acetato de Amonio/ ICP-OES/ NTC 5349 |
| Magnesio intercambiable | Mg | meq/100 g | Sln. Acetato de Amonio/ ICP-OES/ NTC 5349 |
| Sodio intercambiable | Na | meq/100 g | Sln. Acetato de Amonio/ ICP-OES/ NTC 5349 |
| Hierro | Fe | $mg \cdot kg^{-1}$ | Sln. Ácida Mehlich I/ ICP-OES/ NTC 5526 |
| Manganeso | Mn | $mg \cdot kg^{-1}$ | Sln. Ácida Mehlich I/ ICP-OES/ NTC 5526 |
| Cobre | Cu | $mg \cdot kg^{-1}$ | Sln. Ácida Mehlich I/ ICP-OES/ NTC 5526 |
| Zinc | Zn | $mg \cdot kg^{-1}$ | Sln. Ácida Mehlich I/ ICP-OES/ NTC 5526 |
| Boro | B | $mg \cdot kg^{-1}$ | Sln. Fosfato Monobásico de Calcio/ Colorimétrico |
| Azufre | S | $mg \cdot kg^{-1}$ | Sln. Fosfato Monobásico de Calcio/ Turbidimétrico |

## 2.2 Diseño experimental

Se empleó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con arreglo unifactorial, donde el factor de estudio fue la especie de abono verde. Se establecieron 30 unidades experimentales (UP) de 2500 $m^2$ cada una, distribuidas en once municipios. Dentro de cada UP, se asignaron aleatoriamente cuatro parcelas de 625 $m^2$ (para un total de 132 unidades experimentales) para las especies frijol (*Phaseolus vulgaris*), crotalaria (*Crotalaria juncea*), kudzu (*Pueraria phaseoloides*) y maíz (*Zea mays*), en cada unidad productiva (UP). Como parte del manejo agronómico se aplicó un biofertilizante líquido (biol) en dosis de 200 L $ha^{-1}$ al momento de la siembra y 30 días después de la emergencia, con el fin de garantizar homogeneidad en el establecimiento; una vez las plantas alcanzaron máxima desarrollo fisiológico (floración para el caso de poáceas y/o estado lechoso del grano para las fabáceas), se cortaron y se dejaron en superficie para lograr su incorporación biológica al suelo en cada parcela experimental.

## 2.3 Análisis estadístico

Los datos obtenidos correspondieron a variables continuas, asociadas a las propiedades físicas y químicas del suelo y a la producción de biomasa de las especies evaluadas. Previo al análisis se evaluaron los supuestos de normalidad (test de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene). Posteriormente, para evaluar el efecto de los abonos verdes sobre las variables del suelo, se utilizó un análisis de desviación (ANODEV) factorial (DBCA) dentro de un

modelo lineal generalizado (GLM). Se aplicó distribución binomial con enlace logarítmico para la variable "textura" y distribución gaussiana para el resto. El modelo general fue:

Valor ~ Municipio + Tiempo de muestreo + Propiedad edáfica, con ajustes por sobre dispersión utilizando distribución cuasi-Poisson cuando fue necesario.

Los modelos por variable independiente: Variable ~ Municipio * Muestreo, seguido de pruebas post hoc con el paquete multcomp de R, utilizando la función glht para comparaciones de medias vía prueba de Tukey. La significancia estadística se fijó en $p < 0,05$.

Para determinar asociaciones entre las propiedades del suelo y la biomasa de abonos verdes, se aplicó estadística descriptiva por subregión y pruebas de correlación de Pearson. Se considero relevante aquellas correlaciones con $r \geq 0.50$. Todos los análisis se realizaron en R (versión 4.2.1) y complementariamente en el software InfoStat.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Descripción general de la zona

El paisaje dominante en la zona corresponde a unidades de Lomerío con predominio de formas del terreno de cimas y ladera que abarcan cerca del 29,5 % del área evaluada. Estas unidades se asocian a relieves de baja a moderada elevación, con diferencias altitudinales menores a 300 m y pendientes típicas entre 7 % y 12 %, aunque localmente pueden registrarse inclinaciones de hasta el 50 %. La morfología presenta divisorias topográficas que se ramifican desde cimas estrecha o amplias, configurando patrones de drenaje divergentes como lo argumenta [18]. Por otra parte, se encontró el paisaje de Piedemonte en 7,44 % de los predios que se extiende al pie de los sistemas montañosos, serranías y lomeríos, así como superficies planas de suave pendiente con inclinación entre 3 % a 12 %. El 55,5 % de las UP se ubicaron en planicies aluviales y valle y finalmente, se observó paisaje de montaña (7,44 %), en el municipio de Santa Marta, paisaje que se caracteriza por tener una superficie elevada con una topografía accidentada, fuerte control estructural e incisiones profundas encontradas en valles entre montaña, con alturas entre los 1000 m s.n.m a 5700 m s.n.m [17]. Estos porcentajes reflejan la distribución de los sitios experimentales, que fue intencionalmente sesgada hacia zonas de mayor actividad agrícola, pero que cubre la heterogeneidad fisiográfica del departamento (Figura 2).

El departamento se caracteriza por presentar clima cálido seco con un incremento de la precipitación en la temporada lluviosa lo que ocasiona variación de humedad a nivel del suelo, en algunos casos, arídico o transicionales entre el ústico y el údico, con temperaturas promedio de 28 °C, generando un régimen isohipertérmico en el 91,4 % de los suelos, con alta evapotranspiración [17].

Las condiciones ambientales asociadas a las zonas de vida restringen la biomasa y mineralizan la materia orgánica de los suelos; la tipología de los suelos estudiados corresponde a suelos de moderada a baja evolución, de bosque seco y en algunos sectores, monte espinoso o matorral desértico subtropical, condiciones que aceleran procesos de mineralización, salinización, sodización y calcificación.

El 70 % de los suelos de la zona de estudio se clasificaron en el orden Inceptisol. Los subgrupos encontrados de mayor a menor porcentaje fueron: *Typic Haplustepts, Typic Humustepts, Typic Endoaquepts, Typic Dystrudepts, Lithic Haplustepts, Aquic Dystrustepts, Humic Dystrudepts, Fluventic Haplustepts y Fluvaquentic Endoaquepts* El restante 30 % corresponde a Entisoles en los municipios de Sitionuevo, Pivijay, Guamal, San Sebastián y Plato y los subgrupos encontrados de mayor a menor porcentaje fueron: Typic Psammaquents, Typic Ustipsamments y Typic Endoaquents (Figura 3).

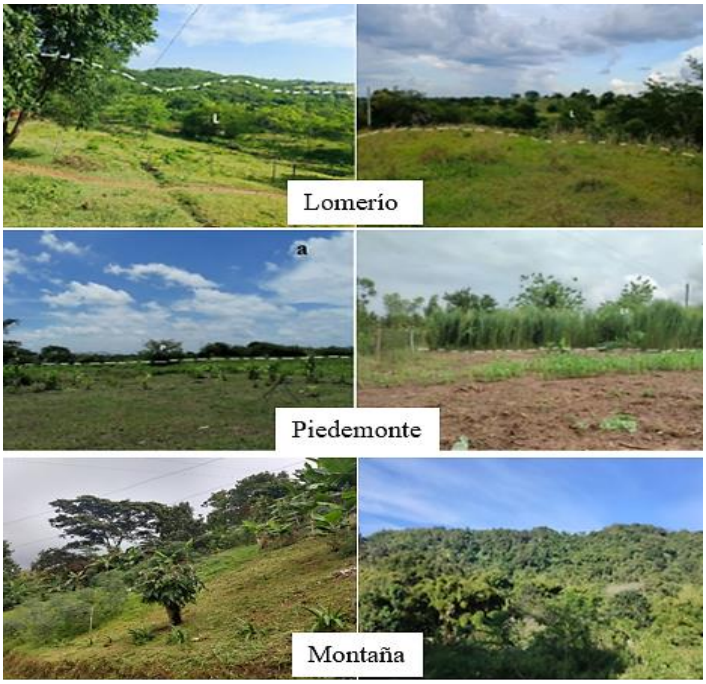



**Figura 2.** Paisajes de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.




**Figura 3.** Perfiles modales representativos de la zona de estudio. a) *Typic Haplustepts* b) *Typic Humustepts*. Fuente: elaboración propia.

## 3.2 Propiedades físicas

Respecto a la clase textural, el análisis estadístico no arrojó diferencias entre los muestreos, es decir, que el uso de abonos verdes no generó cambios en esta variable (X2(2,949) = 521.81; P=0.78). En cuanto a la densidad aparente y la saturación de humedad, no se evidencia diferencias estadísticas en los valores obtenidos en los tres muestreos (Tabla 2), lo que es consistente con la naturaleza estable de estas propiedades que requieren periodos prolongados de manejo continuo para modificarse [19]. Pero se evidenciaron cambios en esta característica entre municipios, influenciados por la localización de cada UP (Figura 4). Estos resultados difieren de los reportados por [19], [20], quienes, trabajando con abonos verdes, encontraron que su incorporación, reduce la densidad aparente, mejora la estructuración, reduce la macroporosidad e incrementa la microporosidad mejorando la capacidad de retención de humedad, efectos atribuidos principalmente al incremento de la materia orgánica en el suelo (MOS).

**Tabla 2.** Valores de P para las variables edáficas evaluadas. Fuente: elaboración propia.

| FV/Variable | D.A | S.H | pH | CE | CICe | COox | K | P | Ca | Mg | Na | Fe | Mn | Cu | Zn | B | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Muestreo | 0,25 | 0,95 | 0,65 | 0,002** | 0,57 | 0,1 | 0,58 | 0,96 | 0,81 | 0,48 | 0,5 | 0,16 | 0,8 | 0,27 | 0,27 | 0,66 | 0,65 |
| Mun*Mue | 0,99 | 0,99 | 0,97 | 0,65 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,95 | 0,8 | 0,89 | 0,7 | 0,39 | 0,75 | 0,99 | 0,86 |

Mun: Municipio. Mue: Muestreo. D.A: Densidad aparente, S.H: Saturación de humedad,
CE: Conductividad eléctrica, CICe: Capacidad de intercambio catiónico, COOx: Carbono orgánico.
**Diferencias significativas con P<0.05.

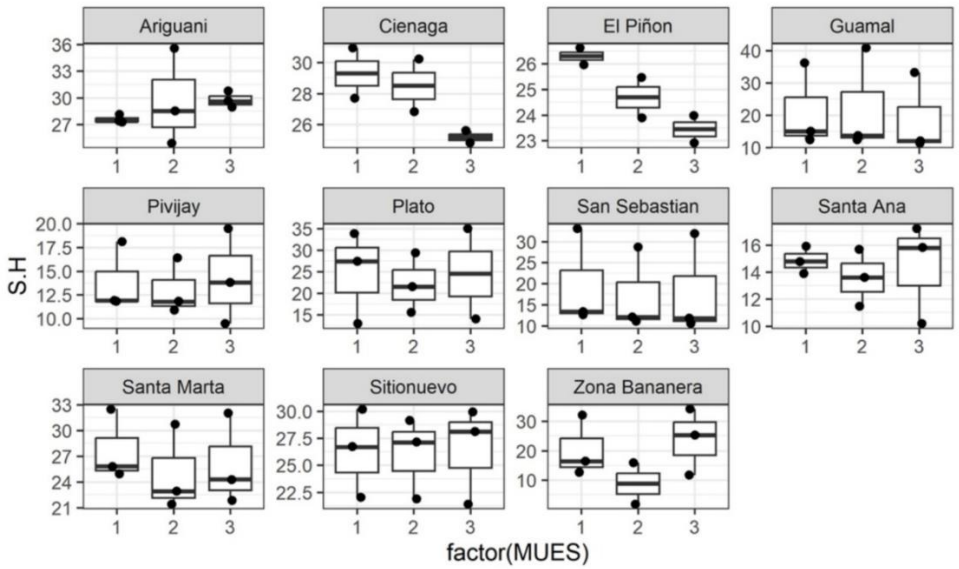



**Figura 4.** Comportamiento de la saturación de humedad. Fuente: elaboración propia.

La ausencia de cambios significativos en densidad aparente y saturación de humedad contrasta con los hallazgos de [19], quienes detectaron reducción hasta del 8 % en densidad aparente tras tres ciclos de abonos verdes. Una posible explicación para esta discrepancia reside en el tiempo de exposición: mientras aquellos estudios emplearon periodos ≥ 2 años, el seguimiento en este estudio se limitó a un ciclo de cultivo, lo que resulta insuficiente para modificar las propiedades físicas [5]. Además, en condiciones de clima seco tropical, la alta tasa de mineralización de la materia orgánica incorporada limita la formación de agregados estables, tal como lo documentaron [5]. Por tanto, es plausible que los beneficios físicos de los

abonos verdes requieran ciclos sucesivos de incorporación para manifestarse, especialmente en regímenes de humedad ústico como los del Caribe seco colombiano.

## 3.3 Propiedades químicas

Al realizar el análisis en conjunto de las variables químicas por municipio y finca, la varianza mostró diferencia con respecto al tiempo de evaluación, es decir, que existe diferenciación de estas con el uso de los abonos verdes. La prueba de comparación de medias de Tukey evidenció que entre los muestreos 1 y 2 no hubo diferencias (P=0.338), pero si, entre del primer y el tercer muestreo (P=<0.001**). En el mismo sentido, al analizar el comportamiento de las propiedades químicas en los 11 Municipios y las UP se observa diferencias significativas. Los municipios que presentaron mayor variación en el tiempo fueron Ciénaga, El Piñón, Guamal, San Sebastián, Santa Marta, Sitio Nuevo y Zona Bananera.

Para el análisis del comportamiento en el tiempo, contemplando el factor muestreo y la interacción entre municipio*muestreo, la conductividad eléctrica (P=0.002) varió y aumentó desde el primer al tercer muestreo (Figura 5a), exceptuando Pivijay, Plato y Santa Marta (Figura 5b). El comportamiento de esta variable sugiere una liberación inmediata de iones solubles procedentes de la biomasa incorporada, fenómeno también observado por [6] en suelos del Brasil semiárido tras el uso de fabáceas. Este aumento puede ser transitorio y estar asociado a la mineralización de compuestos ricos en K, Ca y Mg lo que sugiere estudios con mayor espacio temporal a fin de verificar las bondades del sistema, el cual ha mostrado mejoramiento de las propiedades físicas y químicas [6], [21].

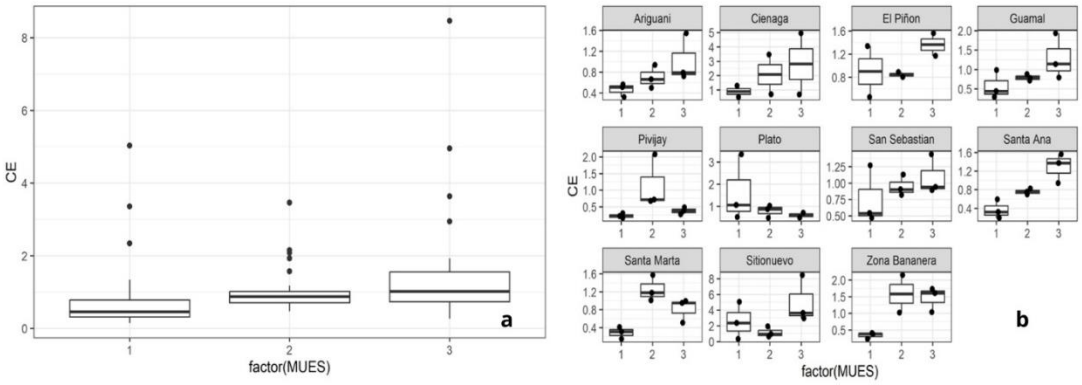



**Figura 5.** Comportamiento de la conductividad eléctrica en el tiempo a. Promedio, b. Por municipio. Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, no todos los estudios coinciden en el efecto de los abonos verdes sobre la conductividad eléctrica. Por ejemplo, [14]no hallaron incrementos significativos en la variable en cítricos tras la incorporación de leguminosas, atribuyéndolo a la rápida absorción de iones por el cultivo principal. En contraste [21] reportaron aumentos sostenidos en CE en Mongolia tras el uso de soya híbrida como abono verde, asociados a altas concentraciones de $K^+$ y $Na^+$ en la biomasa. Los resultados del presente estudio se alinean con los de [6] en el semiárido brasileño, donde el incremento de CE fue transitorio y dependiente de la especie utilizada. Esta variabilidad intraestudios subraya que la respuesta de la CE no es universal, sino que depende de la composición iónica del residuo, la capacidad de intercambio catiónico del suelo y el régimen de lixiviación, factores que deben ser considerados al diseñar sistemas de manejo con la incorporación de abonos verdes en zonas secas.

## 3.4 Análisis de las características edáficas por municipio

A partir de los resultados edáficos obtenidos de la Tabla 3, se logró obtener unas características generales por municipios.

### *3.4.1 Santa Marta*

En los suelos de las UP de Santa Marta predominaron clases texturales arcillo-arenosos y franco-arcillosos, con DA cercanas a 1,26±0,06 g·cm$^{-3}$, saturación de humedad promedio de 26,26 ± 1,45 %. Suelos fuertemente ácidos con pH de 5,3, CE promedio de 0,79 ± 0,16 dS·m$^{-1}$ sin problemas de salinidad y CICe baja (9,62 ± 1,77 meq/100g) típica de texturas arenosas. El contenido de MO fue media y los valores normales de NT (Tabla 3). Se evidenciaron niveles aceptables de bases, pero contenidos altos de P y $Mg^{+2}$, sin restricciones en elementos menores. De acuerdo con su topografía, el suelo se puede cultivar con prácticas agronómicas que eviten procesos de erosión y compactación por lo que es importante continuar con el uso cultivos de coberturas como los abonos verdes y labranza mínima o cero.

### *3.4.2 Ciénaga*

En estas parcelas predominaron elevados contenidos de arcilla, la DA promedio fue de 1,36 ± 0.04 g·cm$^{-3}$, valores que indican buena porosidad y aireación. La saturación de humedad fue de 27,66 ± 1 %, reflejando una aceptable capacidad de retención hídrica. El pH reportó valores superiores a 7,3, que corresponde a suelos alcalinos, condición química que puede afectar la disponibilidad de algunos nutrientes, especialmente fósforo. La CICe fue de 20,25 ± 1,49 meq/100g, considerada alta por lo cual retiene y suministra cationes esenciales para las plantas. El contenido de MO (2,4 ± 0,44 %) se ubicó en un rango medio, indicando una reserva aceptable de carbono edáfico. Se observaron valores altos y variables de fósforo (P) (324,13 ± 95.4 mg·kg$^{-1}$), lo que, en combinación con el pH alcalino, podría favorecer su fijación y, por tanto, limitar su disponibilidad para los cultivos. Este aspecto requiere manejo cuidadoso para evitar deficiencias funcionales de este nutriente. Las bases intercambiables $Ca^{+2}$ y $K^{+}$, presentaron concentraciones elevadas, favoreciendo el desarrollo del cultivo. Respecto a los micronutrientes, no se identificaron limitaciones.

### *3.4.3 Zona bananera*

Los suelos de estas parcelas presentaron predominio de arena y arcilla, la saturación de humedad promedio fue 22,03 ± 3,17 % y DA de 1,42 ± 0,05 g·cm$^{-3}$ lo cual se traduce en un nivel moderado de compactación. Suelos ligeramente ácidos, CICe media (11,27 ± 2,42 meq/100g). Niveles óptimos de bases, contenidos de Ca altos, aunque buena cantidad de elementos menores. Contenido de P alto, pero puede no estar disponible. Para este tipo de suelo, es importante implementar manejos que promuevan incrementos en la MO, que contribuya a dar mayor disponibilidad a los nutrientes presentes.

### *3.4.4 Plato*

Los suelos de las UP de Plato se caracterizan porque predomina la arena, DA de 1,39 ± 0,07 g·cm$^{-3}$ y saturación de humedad 22,36 ± 3,83 %, en su mayoría porosos y aireados. Suelos moderadamente ácidos y sin problemas de salinidad, con adecuada disponibilidad de nutrientes y que sumado a una media a alta CICe (16,38 ± 5,04 meq/100g), son capaces de retener cationes intercambiables como el $Ca^{+2}$, $K^{+}$ y $Mg^{+2}$. Por otra parte, presentan NT normal, relacionada con sus porcentajes de MO de 2,31 ± 0,58 %. Los resultados evidencian contenidos adecuados de micronutrientes.

**Tabla 3** Características edáficas evaluadas. Fuente: elaboración propia.

| Municipio | D.A | S.H | pH | CE | M.O | NT | CICe | $K^{+}$ | $Ca^{+2}$ | $Mg^{+2}$ | $Na^{+}$ | P | Fe | Mn | Cu | Zn | B | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $g{\cdot}cm^{-3}$ | % | | $dS{\cdot}m^{-1}$ | % | meq/100 g | | | | | | mg·kg⁻¹ | | | | | | |
| Santa Marta | 1,26 ±0,06 | 26,26 ±1,45 | 5,33 ±0,52 | 0,79 ±0,16 | 4,09 ±0,89 | 0,2 ±0,04 | 9,62 ±1,77 | 0,26 ±0,06 | 7,48 ±1,58 | 1,03 ±0,27 | 0,13 ±0,03 | 239,41 ±82,17 | 54,04 ±6,69 | 37,13 ±4,76 | 4,17 ±0,58 | 14,1 ±6,49 | 0,43 ±0,13 | 6,23 ±1,1 |
| Ciénaga | 1,36 ±0,04 | 27,66 ±1 | 7,56 ±0,26 | 1,93 ±0,75 | 2,4 ±0,44 | 0,12 ±0,02 | 20,25 ±1,49 | 1,52 ±0,53 | 14,92 ±1,72 | 2,89 ±0,16 | 0,95 ±0,27 | 324,13 ±95,4 | 49,43 ±7,88 | 45,43 ±6,85 | 7,46 ±3,05 | 2,85 ±0,69 | 1,5 ±0,36 | 38,97 ±11,21 |
| Zona Bananera | 1,42 ±0,05 | 22,03 ±3,17 | 6,22 ±0,14 | 1,07 ±0,25 | 1,93 ±0,45 | 0,09 ±0,02 | 11,27 ±2,42 | 0,36 ±0,09 | 8,22 ±1,90 | 3,85 ±0,47 | 0,19 ±0,03 | 50,09 ±16,05 | 129,98 ±29,04 | 34,5 ±4,42 | 7,33 ±5,54 | 3,22 ±1,0 | 0,54 ±0,15 | 8,94 ±1,69 |
| Plato | 1,39 ±0,07 | 22,36 ±3,83 | 5,52 ±0,16 | 0,78 ±0,10 | 2,31 ±0,58 | 0,11 ±0,03 | 16,38 ±5,04 | 0,52 ±0,16 | 10,82 ±3,3 | 4,71 ±1,63 | 0,28 ±0,11 | 20,02 ±5,69 | 26,1 ±5,48 | 22,73 ±1,03 | 1,12 ±0,12 | 2,83 ±0,24 | 0,4 ±0,08 | 11,26 ±3,78 |
| Ariguaní | 1,29 ±0,02 | 29,01 ±0,99 | 6,19 ±0,26 | 0,73 ±0,12 | 3,12 ±0,22 | 0,15 ±0,01 | 28,36 ±1,8 | 0,68 ±0,07 | 21,13 ±1,83 | 6,26 ±0,53 | 0,28 ±0,07 | 36,76 ±11,5 | 26,92 ±2,59 | 29,31 ±5,28 | 1,03 ±0,07 | 3,43 ±0,4 | 0,61 ±0,07 | 12,11 ±1,69 |
| Sitionuevo | 1,42 ±0,03 | 26,27 ±1,19 | 6,73 ±0,13 | 2,91 ±0,86 | 1,83 ±0,3 | 0,09 ±0,01 | 17,09 ±2,13 | 0,3 ±0,06 | 11,36 ±1,23 | 1,3 ±0,62 | 1,58 ±0,49 | 101,44 ±16,79 | 239,93 ±42,2 | 51,34 ±3,51 | 4,84 ±0,73 | 9,78 ±0,66 | 0,62 ±0,11 | 39,71 ±11,1 |
| Pivijay | 1,54 ±0,02 | 13,74 ±1,16 | 5,39 ±0,2 | 0,59 ±0,20 | 0,85 ±0,12 | 0,04 ±0,01 | 4,26 ±1,18 | 0,11 ±0,02 | 2,6 ±0,83 | 1,18 ±0,38 | 0,16 ±0,04 | 12,95 ±5,65 | 99,93 ±29,12 | 21,08 ±7,36 | 0,87 ±0,08 | 1,63 ±0,44 | 0,22 ±0,03 | 8,71 ±2,67 |
| El Piñón | 1,47 ±0,09 | 24,81 ±0,58 | 5,69 ±0,43 | 1,04 ±0,16 | 2,21 ±0,22 | 0,11 ±0,01 | 25,32 ±3,45 | 0,53 ±0,05 | 15,02 ±4,1 | 7,68 ±1,58 | 1,66 ±0,31 | 37,7 ±21,01 | 165,54 ±30,88 | 24,86 ±5,01 | 2,23 ±0,39 | 3,56 ±1,5 | 0,39 ±0,06 | 12,47 ±2,7 |
| San Sebastián | 1,44 ±0,03 | 18,34 ±3,26 | 6,02 ±0,22 | 0,93 ±0,11 | 1,45 ±0,23 | 0,07 ±0,01 | 12,95 ±5,12 | 0,24 ±0,07 | 5,19 ±1,35 | 6,5 ±3,32 | 0,96 ±0,47 | 15,58 ±5,62 | 32,48 ±13,5 | 30,72 ±3,61 | 1,54 ±0,09 | 6,42 ±1,85 | 0,27 ±0,04 | 11,33 ±3,45 |
| Santa Ana | 1,52 ±0,02 | 14,29 ±0,75 | 5,51 ±0,16 | 0,8 ±0,15 | 0,96 ±0,09 | 0,05 ±0,0 | 4,56 ±0,88 | 0,13 ±0,03 | 3,23 ±0,64 | 1,03 ±0,21 | 0,12 ±0,03 | 28,45 ±8,39 | 90,32 ±47,78 | 19,49 ±1,03 | 1,1 ±0,12 | 3,1 ±0,79 | 0,17 ±0,01 | 6,24 ±0,95 |
| Guamal | 1,40 ±0,08 | 20,77 ±4,05 | 5,36 ±0,29 | 0,88 ±0,16 | 2,43 ±0,84 | 0,12 ±0,04 | 12,38 ±5,17 | 0,36 ±0,14 | 7,7 ±3,18 | 4,05 ±1,89 | 0,16 ±0,05 | 5,87 ±2,27 | 48,63 ±12,75 | 26,34 ±5,8 | 1,37 ±0,15 | 4,03 ±0,92 | 0,26 ±0,03 | 7,78 ±1,42 |
| Cv | 11,14 | 38,29 | 16,51 | 106,2 | 75,77 | 75,78 | 79,23 | 122,47 | 81,87 | 2,49 | 157,17 | 181,60 | 111,79 | 52,44 | 184,53 | 141,81 | 95,00 | 122,21 |

### *3.4.5 Ariguaní*

En este municipio se evidenció suelos arcillosos, con DA de 1,29 ± 0,02 g·cm$^{-3}$, y saturación de humedad de 29,01 ± 0,99 %, suelos ligeramente ácidos y con CE de 0,73 ± 0,12 dS·m$^{-1}$, lo cual indica que presenta una cantidad adecuada de nutrientes solubles para el desarrollo de las plantas. Presentan CICe de 28,36 ± 1,8 meq/100g y contenidos de MO y NT dentro de rangos normales a altos. Las bases intercambiables, el P y los elementos menores no presentan mayor limitación. Estos suelos tienden a ser menos susceptible a lixiviación de nutrientes solubles, lo cual es benéfico y facilita la fertilización de los cultivos.

### *3.4.6 Sitionuevo*

Los suelos de este municipio se caracterizaron por presentar contenidos de arcilla y arena en proporciones cercanas al 40 %, con densidades aparentes de 1,42 ± 0,03 g cm$^{-3}$ tendientes a presentar problemas de compactación. Su saturación de humedad es de 26,27 ± 1,19 % y pH prácticamente neutros y con CE de 2,91 dS·m$^{-1}$, parámetro que puede limitar el desarrollo normal de los cultivos. En cuanto a la CICe indica que hay buena capacidad de retención de cationes y, según los resultados del análisis, el $Ca^{+2}$, $Mg^{+2}$, $K^{+}$ y $Na^{+}$ se encuentran en niveles elevados. Como limitante principal de estos suelos encontramos los bajos contenidos de MO y, por tanto, de NT, lo que afectan el desarrollo de cualquier especie. Por lo que es importante la incorporar materia orgánica para mejorar la estructura, la porosidad y la retención de humedad; así mismo, es fuente natural de nutrientes y estimula la actividad microbiana en el suelo.

### *3.4.7 Pivijay*

En este municipio se encontraron suelos con texturas arenosas (79,55 ± 4,07 %) y DA 1,54 ± 0,02 g·cm$^{-3}$, con buen drenaje y por tal razón su saturación de humedad es baja (13,74 ± 1,16 %). Lo anterior, sumado a su pH fuertemente ácido, hace que la retención y disponibilidad de elementos esenciales para la nutrición, sea bajo reflejándose en una baja CICe (4,26 ± 1,18 meq/100g) y valores bajos de Ca (2,6 ± 0,83 meq/100g), Mg (1,18 ± 0,38 meq/100g), K (0,11 ±0,02 meq/100g). En el mismo sentido, el contenido de la MO y por tanto de NT son restringidos. Finalmente, no se evidencian limitantes en elementos menores, excepto de Cu. En general, es un suelo con bastantes limitantes ya que la acidez puede afectar la disponibilidad de nutrientes como el P, $Ca^{+2}$ y $Mg^{+2}$, que pueden volverse menos solubles y que puede existir una posible toxicidad de aluminio y de manganeso (21,08 ± 7,36 mg·kg$^{-1}$), como lo evidenciaron los resultados del laboratorio.

### *3.4.8 El Piñón*

Los suelos del municipio de El Piñón presentaron texturas arcillosas y arcillo-arenosas, con una DA promedio de 1,47 ± 0,09 g·cm$^{-3}$ y saturación de humedad de 24,81 ± 0,58 %, lo que indica una adecuada estructura y capacidad de retención hídrica. El pH reveló una condición de moderada acidez, sin presencia de sales, lo que favorece el desarrollo de raíces. El contenido de materia orgánica y nitrógeno total se consideró óptimo para las condiciones locales, y la capacidad de intercambio catiónico (CICe) fue alta (25,32 ± 3,45 meq/100g), condición que refleja un suelo con buena capacidad para retener y suministrar nutrientes esenciales. Las concentraciones de bases y micronutrientes también fueron elevadas, sin indicios de deficiencias.

### *3.4.9 San Sebastián*

El municipio presentó suelos arenosos y franco arenosos, con DA 1,44 ± 0,03 g·cm$^{-3}$ y saturación de humedad 18,34 ± 3,26 %, que se caracterizan por tener una buena porosidad y drenaje. Su pH es ligeramente acido y no presenta problemas de salinidad. Tiene un CICe

medio de 12,95 ± 5,12 meq/100 g y valores en bases y micronutrientes óptimos. Como limitante principal de este suelo se encontró que presenta muy bajos contenidos de MO y de NT, por lo que su incremento mediante el uso e incorporación de abonos verdes se hace fundamental y contribuirá a la disponibilidad de nutrientes.

### *3.4.10 Guamal*

Los suelos del municipio se caracterizaron por ser franco-arenosos y densidad aparente media (1,4 $g \cdot cm^{-3}$) lo que le otorga facilidad para el movimiento del agua y del aire además de la capacidad de enraizamiento por parte de las plantas. El pH es extremadamente ácido (pH<5,5) lo que puede interferir en la disponibilidad de nutrientes como N, P, Ca, Mg y K para los cultivos, a la vez que favorece la solubilidad de micronutrientes y de otros elementos como $Al^{+3}$, $Fe^{+2}$ y $Mn^{+2}$, generando fijación de fosfatos. Pese a lo anterior, se verifica limitada disponibilidad de $K^{+}$, $Ca^{+2}$ y $Mg^{+2}$. La CICe los cataloga como suelos desaturados con baja capacidad de retención, lo que se debe principalmente a la baja proporción de arcilla y de materia orgánica en estos suelos.

### *3.4.11 Santa Ana*

Los suelos de este municipio presentaron texturas areno francosas, con densidad baja que le otorga alta porosidad y con ello, limitaciones para la retención de agua y nutrientes. Mostraron pH de ligeramente ácido a extremadamente ácido (promedio de 5,2) condición que incrementa la solubilidad del $Al^{+3}$, $Fe^{+2}$ y del $Mn^{+2}$ que, unidos al bajo contenido de MO, exhibió impactos en la disponibilidad de macronutrientes como el N, P, Ca, Mg y K los cuales se encontraron en niveles bajos. Por su parte, se verificaron elevadas concentraciones de micronutrientes. Las diferencias edáficas observadas entre municipios son reflejo de la influencia combinada del material parental, la posición en el paisaje y el régimen hídrico. Así, las limitaciones encontradas en los suelos estudiados son típicas de suelos degradados del trópico seco [22]. Por su parte, la predominancia de Inceptisoles con desarrollo moderado, sugiere sistemas de baja evolución y limitada presencia de horizontes diagnósticos, lo que condiciona su capacidad de amortiguación frente a disturbios agrícolas.

La fertilidad varió entre municipios. Ejemplo de ello son los suelos de Santa Marta con pH fuertemente ácido, texturas arcillo-arenosas y limitaciones en CICe y MO mientras que los de Ciénaga, con pH alcalino y alta CICe, mostraron mayor fertilidad potencial, aunque la disponibilidad de P puede estar restringida por fijación a carbonatos [23]. Estas diferencias subrayan la necesidad de estrategias de manejo específicas por sitio.

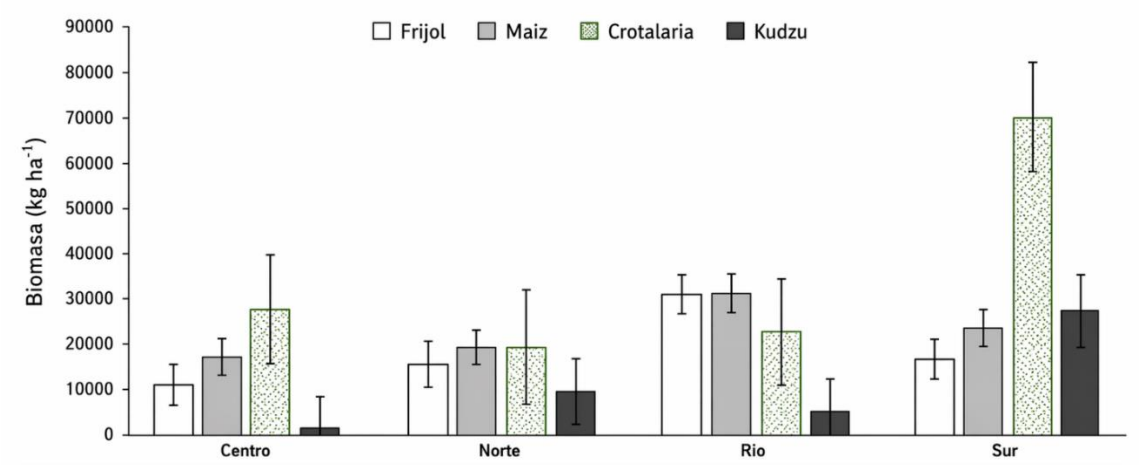
La heterogeneidad edáfica observada entre municipios es consistente con lo reportado por [2] para el caribe seco colombiano, quienes encontraron que los suelos derivados de calizas (como los de Ciénaga) presentan pH alcalino y alta CICe, mientras que los suelos sobre granitos y areniscas (Santa Marta, Pivijay) son ácidos y de baja fertilidad. Comparativamente los valores de materia orgánica en la mayoría de los municipios se ubican por debajo del umbral crítico (3 %) sugerido por [22] para suelos tropicales regenerativo, lo que evidencia estado avanzado de degradación. Sin embargo, estos valores son superiores a los reportados por [1] en ambientes áridos de la India, lo que indica que, pese a las limitaciones, los suelos del Magdalena aún conservan potencial de recuperación mediante prácticas agroecológicas.

## 3.5 Correlación de la producción de biomasa de los abonos verdes con las propiedades Edáficas por región

El análisis realizado evidenció que la producción de biomasa de los abonos verdes se correlaciona positiva o negativamente con diversas propiedades fisicoquímicas del suelo, dependiendo tanto de la especie evaluada como de la subregión agroecológica.

### *3.5.1 Subregión Norte (Santa Marta, Ciénaga y Zona Bananera)*

Los suelos de este municipio presentaron texturas areno-francosas, con densidad baja que le otorga alta porosidad. En esta subregión, las especies con mayor producción promedio de biomasa fueron *Z. mays* (19693,3 kg·ha$^{-1}$) y *C. juncea* (19680 kg·ha$^{-1}$), mientras que el *P. phaseoloides* presentó la menor (9680 kg·ha$^{-1}$). La biomasa de *Z. mays* mostró una correlación positiva fuerte con fósforo (P) y zinc (Zn), y una correlación negativa moderada con hierro (Fe). *P. phaseoloides* presentó correlaciones exclusivamente positivas con pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CICe), potasio (K), calcio (Ca), sodio (Na), manganeso (Mn), boro (B) y azufre (S). Por su parte, P. vulgaris se correlacionó positivamente con arena (A), P, Mn, cobre (Cu) y Zn. *C. juncea* mostró correlaciones positivas con densidad aparente (DA), arcilla (Ar) y pH, y correlaciones negativas con A, saturación de humedad (SH), carbono orgánico (CO) y nitrógeno total (NT), (Figura 6).




| | Centro | Norte | Rio | Sur |
|---|---|---|---|---|
| Frijol | 10800 | 15660 | 30833,3 | 16685,7 |
| Maiz | 17400 | 19693,3 | 31400 | 24228,5 |
| Crotalaria | 27700 | 19680 | 23066,6 | 69942,80 |
| Kudzu | 1011 | 9680 | 5200 | 27885,7 |

**Figura 6.** Producción promedio de biomasa de los abonos verdes por subregión.
Fuente: elaboración propia.

### *3.5.2 Subregión Centro (Ariguaní y Plato)*

En esta zona, *C. juncea* alcanzó la mayor producción de biomasa (27722 kg·ha$^{-1}$), mientras que *P. phaseoloides* presentó la menor (1011 kg·ha$^{-1}$). La biomasa de *C. juncea* correlacionó negativamente con DA y Ar, y positivamente con las demás propiedades del suelo, con excepción de CE, Mn y Zn. *P. phaseoloides* y *P. vulgaris* mostraron correlaciones positivas con Mn y Zn, y negativas con pH y Cu. En el caso de *Z. mays*, se observaron correlaciones positivas con Ar, limo (L), SH, CICE, carbono orgánico oxidado (COox), materia orgánica (MO), NT, K, Ca, Fe y Cu; y negativas con DA, Ar y CE.

### *3.5.3 Subregión Río (El Piñón, Sitionevo y Pivijay)*

*Z. mays y P. vulgaris* registraron las mayores producciones de biomasa (31400 kg ha$^{-1}$ y 30833,3 kg ha$^{-1}$, respectivamente), mientras que el *P. phaseoloides* presentó la menor (5200 kg ha$^{-1}$). La biomasa de *P. vulgaris* correlacionó negativamente con CE, P, Na, B y S. En el caso de *Z. mays*, se encontró una correlación negativa únicamente con *P. P. phaseoloides*

presentó correlaciones positivas con CICe, K, P, Ca, Mg y B, y negativas con Fe, Mn, Cu y Zn. No se encontraron correlaciones significativas para *C. juncea* en esta subregión.

### *3.5.4 Subregión Sur (Santa Ana, Guamal y San Sebastián)*

*C. juncea* presentó la mayor producción de biomasa (69942,8 kg·ha$^{-1}$), aunque no mostró correlaciones significativas con ninguna variable edáfica. En contraste, el *P. vulgaris* tuvo la menor producción (16685,7 kg·ha$^{-1}$) y se correlacionó negativamente con el pH. *Z. mays* presentó correlaciones negativas con pH y P. Finalmente, el *P. phaseoloides* mostró correlaciones negativas con CICE, Ca, Na y Fe.

De forma general, las mayores correlaciones entre la producción de biomasa y las propiedades físicas y químicas del suelo se presentaron en las subregiones Centro y Norte, donde los niveles de producción de biomasa fueron relativamente más bajos. Por el contrario, en las subregiones Sur y Río, a pesar de registrarse las mayores producciones de biomasa (Figura 6), se observó menores correlaciones significativas, lo que podría indicar mayor resiliencia de las especies en estas condiciones edáficas o menor sensibilidad de la respuesta productiva frente a las variaciones del suelo. Esta observación se encuentra alineada con lo reportado por [6] quienes afirman que la elevada producción de biomasa y su incorporación como abono verde, juega un papel fundamental en la sustentabilidad de los sistemas agrícolas.

A pesar de la implementación de prácticas agroecológicas, los resultados mostraron que las propiedades físicas del suelo (textura, DA y H) no presentaron cambios significativos en el tiempo de monitoreo, lo cual es coherente dado que estas propiedades son relativamente estables y menos sensibles a variaciones en el corto plazo. Sin embargo, a nivel de propiedades químicas, se identificó una variación significativa en la conductividad eléctrica (CE), lo que sugiere una ligera modificación en la dinámica iónica del suelo tras la incorporación de biomasa vegetal.

Un hallazgo clave fue la existencia de correlaciones específicas entre la biomasa (abono verde) y algunas propiedades edáficas, que variaron significativamente entre subregiones.

En la subregión Norte, *Z. mays* y *C. juncea* mostraron la mayor producción de biomasa (>19600 kg·ha$^{-1}$), siendo *Z. mays* particularmente correlacionada de forma positiva con el fósforo (P) y zinc (Zn), mientras que *P. vulgaris* y *P. phaseoloides* presentaron correlaciones positivas con elementos como Mn, Cu, K y B, revelando su capacidad para responder favorablemente a suelos con mayor disponibilidad de estos nutrientes.

En la subregión Centro, *C. juncea* fue la especie más productiva (27722 kg·ha$^{-1}$), y su biomasa se correlacionó negativamente con la densidad aparente (DA) y la arcilla, y positivamente con variables como carbono orgánico (CO), nitrógeno total (NT) y CICe, lo que indica una sensibilidad a suelos bien estructurados y fértiles. Por el contrario, *P. phaseoloides* mostró baja producción (1011 kg·ha$^{-1}$) y relaciones positivas con Mn y Zn, pero negativas con pH y Cu, lo cual podría reflejar una mayor exigencia edáfica para su desarrollo en esta zona.

En la subregión Río, Z. mays y P. vulgaris lideraron la producción de biomasa (más de 30000 kg·ha$^{-1}$), sin embargo, presentaron correlaciones predominantemente negativas con propiedades químicas como CE, P y Na. Estas correlaciones podrían indicar que en suelos con mayor concentración salina o con nutrientes disponibles en exceso, algunas especies podrían reducir su eficiencia fisiológica o su tasa de acumulación de biomasa.

En la subregión Sur, *C. juncea* alcanzó la mayor producción de biomasa (69942,8 kg·ha$^{-1}$), pero sin correlaciones estadísticamente significativas, lo que puede interpretarse como una mayor plasticidad fisiológica de esta especie frente a variaciones edáficas. Este comportamiento sugiere su adaptabilidad como especie de abono verde en zonas con condiciones edafoclimáticas heterogéneas. *P. phaseoloides*, aunque menos productivo, mostró correlaciones directas con nutrientes claves (K+, $Ca^{+2}$, $Mg^{+2}$, B), lo que refuerza su potencial para suelos degradados, argumento ratificado por [22] quienes concluyen que esta leguminosa fija nitrógeno (100 kg a 300 kg de N·ha$^{-1}$) en el trópico y proporciona hojarasca (materia orgánica), no obstante [23] sostienen que *P. phaseoloides* en el trópico disminuye el

reciclaje de nutrientes con la edad siendo conveniente su renovación. Por el contrario, *P. vulgaris* y *Z. mays* mostraron correlaciones negativas con pH y P, lo cual puede limitar su desempeño en suelos ácidos o con baja disponibilidad de fósforo.

En términos generales, las subregiones Centro y Norte presentaron mayor cantidad de correlaciones entre biomasa y variables edáficas (Tabla 4), a pesar de registrar menor biomasa, lo que indica que, en suelos con restricciones, las especies responden de forma diferencial según sus requerimientos fisiológicos. En contraste, en las subregiones Sur y Río, donde se registró mayor producción, las correlaciones fueron menores, lo cual puede interpretarse como una menor sensibilidad de las especies a las variaciones edáficas o una mayor resiliencia ecológica en condiciones favorables [24].

Las correlaciones especie-específicas encontradas en las subregiones Centro y Norte coinciden parcialmente con lo documentado por [8], quienes observaron que *C, juncea* presenta una relación positiva con el contenido de arcilla y negativa con la densidad aparente, atribuible a su sistema de raíces pivotantes que puede explorar horizontes más profundos.

Por otra parte, la ausencia de correlaciones para *C. juncea* en la subregión Sur, pese a su máxima producción de biomasa (≈70 $t \cdot ha^{-1}$), es un hallazgo novedoso que contrasta con estudios como el de [13] en la costa peruana, donde la biomasa se relacionó con la CICe y el nitrógeno total. Una posible explicación de este comportamiento es que, en condiciones de alta fertilidad, la producción de biomasa alcanza un techo fisiológico determinado principalmente por factores genéticos y climáticos y deja de ser sensible a variaciones edáficas moderadas [24], [25].

Los resultados (Tabla 4) indican que *C. juncea* mostró la mayor adaptabilidad en suelos fértiles (subregión Centro), pero su comportamiento fue inverso en zonas con menor contenido de materia orgánica y CICe (subregión Norte). *P. phaseoloides* mostró respuestas positivas en varios contextos, lo que lo hace una especie promisoria para cobertura edáfica. *Z. mays* y *P. vulgaris*, al ser especies antropogenizadas, posiblemente exigen y requieren condiciones más controladas para expresar su potencial, esto explicaría los bajos coeficientes en Sur y Río. En general, las subregiones Centro y Norte mostraron mayor dinamismo edáfico-productivo, mientras que Río y Sur requieren estrategias específicas para mejorar la respuesta de las variables edáficas de estudio.

*C. juncea*, por su rendimiento se destacó como la especie con mayor potencial para escalar estrategias de manejo sustentable del suelo en el Caribe colombiano. Sin embargo, el éxito de estas prácticas dependerá también del tiempo de implementación, ya que los efectos más profundos sobre las propiedades del suelo podrían evidenciarse en ciclos más prolongados de evaluación y con seguimiento continuo. Lo anterior coincide con lo expresado por [13] quienes argumentan que la *C. juncea* es una leguminosa valiosa como abono verde gracias a sus múltiples beneficios agronómicos, fija el nitrógeno atmosférico, enriqueciendo el suelo y reduce nematodos fitopatógenos y ciertos hongos, mejorando la salud del suelo [6]. Por su sistema de raíces mejora la estructura del suelo, previene la erosión [25] y aumenta la retención de agua y materia orgánica [19], [20], ideal para la rotación de cultivos, interrumpiendo los ciclos de fitopatógenos.

En la Figura 7 se evidencia que los datos de contenidos de carbono orgánico (C.O) y materia orgánica (M.O) suelos por UP y subregiones (Centro, Norte, Río y Sur) en el primer muestreo, fueron menores respecto al segundo, lo que sugiere que la incorporación de los abonos verdes, promueven el incremento de MO.

**Tabla 4.** Tabla de valores del índice de correlación de Pearson. Fuente: elaboración propia.

| | | DA | Ar | A | L | SH | pH | CE | ClCe | CO | MO | NT | K | P | Ca | Mg | Na | Fe | Mn | Cu | Zn | B | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Centro | *C. juncea* | -0,72 | 0,74 | -0,73 | 0,7 | 0,76 | 0,78 | -0,34 | 0,91 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,93 | 0,98 | 0,87 | 0,93 | 0,62 | 0,9 | -0,4 | 0,84 | -0,21 | 0,89 | 0,97 |
| | *P. phaseoloides* | -0,3 | 0,26 | -0,29 | 0,34 | 0,21 | -0,64 | 0,22 | -0,05 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | -0,25 | -0,3 | -0,03 | -0,06 | -0,2 | -0,23 | 0,99 | -0,56 | -0,63 | 0,03 | -0,22 |
| | *P. vulgaris* | -0,24 | 0,21 | -0,23 | 0,27 | 0,16 | -0,63 | 0,16 | -0,1 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | -0,28 | -0,35 | -0,07 | -0,14 | -0,31 | -0,25 | 0,99 | -0,57 | -0,55 | -0,05 | -0,27 |
| | Z. mays | -0,69 | 0,72 | -0,68 | 0,56 | 0,74 | 0,48 | -0,81 | 0,61 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,63 | 0,48 | 0,7 | 0,4 | -0,41 | 0,68 | 0,45 | 0,53 | -0,02 | 0,43 | 0,48 |
| Norte | *C. juncea* | 0,87 | -0,59 | 0,92 | -0,79 | -0,96 | 0,64 | 0,04 | -0,25 | -0,8 | -0,8 | -0,8 | -0,06 | 0,19 | -0,22 | -0,22 | 0,15 | 0,04 | -0,16 | -0,05 | 0,19 | -0,26 | -0,07 |
| | *P. phaseoloides* | 0,11 | 0,3 | -0,17 | -0,07 | 0,14 | 0,52 | 0,86 | 0,65 | -0,16 | -0,16 | -0,16 | 0,97 | 0,49 | 0,53 | 0,49 | 0,85 | -0,41 | 0,51 | -0,38 | 0,18 | 0,71 | 0,88 |
| | *P. vulgaris* | 0,22 | 0,7 | -0,31 | -0,31 | 0,17 | 0,21 | -0,3 | 0,32 | -0,21 | -0,21 | -0,21 | -0,04 | 0,5 | 0,41 | 0,19 | -0,27 | 0,48 | 0,81 | 0,67 | 0,52 | 0,17 | -0,16 |
| | Maíz | -0,15 | 0,12 | -0,22 | 0,21 | 0,07 | 0,16 | 0,18 | 0,25 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,43 | 0,86 | 0,25 | -0,14 | 0,26 | -0,54 | 0,43 | -0,41 | 0,78 | 0,35 | 0,21 |
| Río | *C. juncea* | 0,22 | 0,37 | -0,32 | 0,03 | 0,31 | 0,01 | -0,14 | -0,19 | -0,02 | -0,02 | -0,02 | -0,21 | -0,41 | -0,22 | 0,29 | -0,25 | -0,08 | 0,08 | 0,13 | -0,03 | -0,27 | -0,22 |
| | *P. phaseoloides* | -0,11 | 0,34 | -0,31 | 0,12 | 0,16 | 0,39 | -0,43 | 0,7 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,81 | 0,52 | 0,71 | 0,53 | -0,18 | -0,74 | -0,59 | -0,63 | -0,65 | 0,5 | -0,27 |
| | *P. vulgaris* | 0,31 | -0,07 | 0,12 | -0,32 | -0,12 | -0,26 | -0,58 | -0,38 | -0,33 | -0,34 | -0,34 | -0,38 | -0,59 | -0,36 | -0,03 | -0,7 | -0,41 | -0,33 | -0,13 | -0,4 | -0,6 | -0,64 |
| | Maíz | 0,47 | 0,13 | -0,07 | -0,24 | 0,05 | -0,18 | -0,24 | -0,33 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,3 | -0,55 | -0,35 | 0,07 | -0,37 | -0,22 | -0,1 | -0,08 | -0,17 | -0,43 | -0,25 |
| Sur | *C. juncea* | 0,04 | 0,18 | -0,08 | -0,04 | 0,05 | -0,24 | 0,11 | 0,11 | -0,01 | -0,01 | -0,01 | -0,09 | 0,21 | 0,14 | 0,07 | 0,08 | 0 | -0,03 | -0,01 | -0,36 | -0,09 | -0,19 |
| | *P. phaseoloides* | 0,38 | -0,36 | 0,43 | -0,42 | -0,48 | 0,02 | -0,36 | -0,5 | -0,43 | -0,43 | -0,43 | -0,35 | -0,09 | -0,5 | -0,47 | -0,76 | -0,55 | 0,22 | -0,06 | 0,29 | -0,27 | -0,2 |
| | *P. vulgaris* | 0,19 | 0,18 | 0,04 | -0,25 | -0,13 | -0,54 | 0,38 | -0,13 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,02 | 0,26 | -0,12 | -0,14 | -0,47 | -0,12 | -0,09 | -0,05 | -0,43 | -0,29 | -0,39 |
| | Maíz | 0,02 | -0,3 | 0,24 | -0,14 | -0,18 | -0,51 | 0,4 | -0,19 | -0,09 | -0,09 | -0,09 | -0,11 | -0,56 | -0,21 | -0,16 | -0,07 | -0,02 | -0,21 | 0,07 | -0,39 | -0,05 | -0,2 |

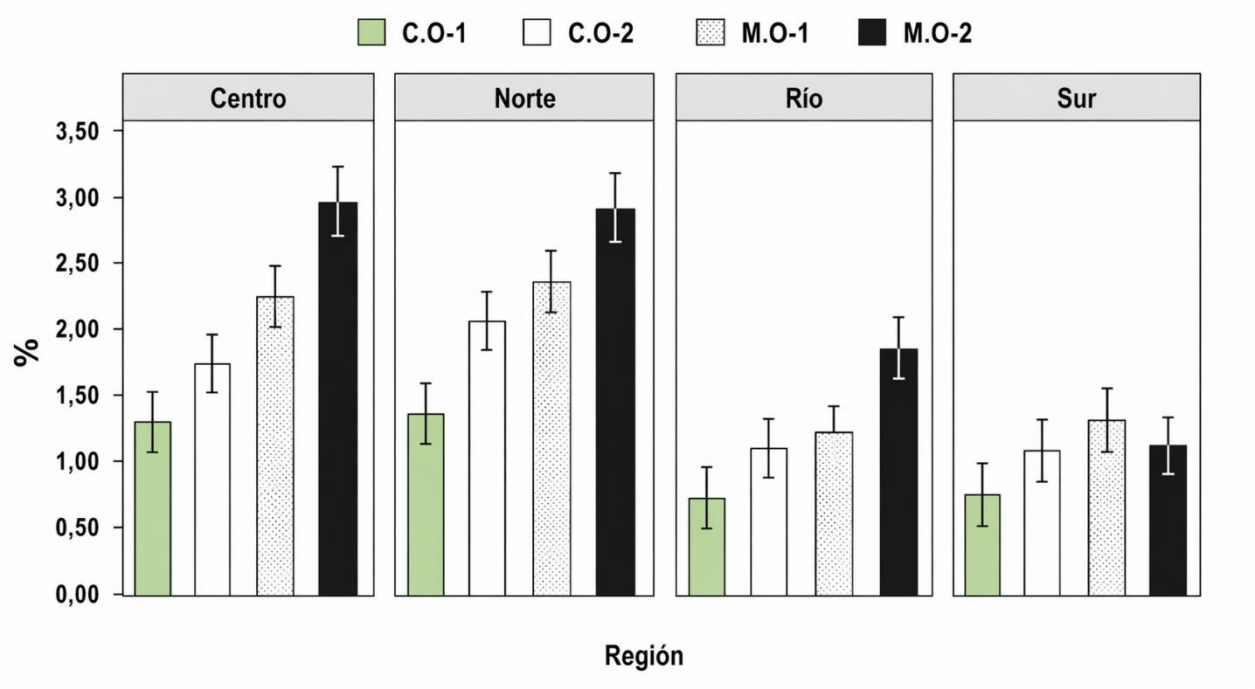



**Figura 7.** Contenidos MO y CO promedio en suelos por muestreo y subregión.
Fuente: elaboración propia.

Al generar los promedios de la variable % MO las subregiones Centro y Norte presentaron mejor respuesta, mientras que Río mostró un avance relevante ante condiciones degradadas. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar tanto la especie vegetal como las condiciones edafoclimáticas locales para optimizar el uso de las especies de abonos verdes en sistemas agroecológicos, fortaleciendo el argumento de [7] quienes concluyen que el uso de coberturas, como especies de abonos verdes, permiten incrementar MO en suelo degradados.

La incorporación de especies empleadas como abonos verdes evidenció efectos diferenciados sobre los indicadores de calidad del suelo, lo que confirma que la respuesta del sistema no depende exclusivamente del aporte de biomasa, sino de la interacción entre la calidad de los residuos, las condiciones edafoclimáticas y el estado inicial del suelo [26]. Comportamiento consistente con la teoría de que la descomposición y la liberación de nutrientes están reguladas por la relación C/N de los residuos y por la actividad microbiana, la que puede verse intensificada en condiciones de alta temperatura y humedad variable, características de ambientes tropicales secos [6], [7], [12].

La magnitud de los cambios observados en las propiedades químicas sugiere que los abonos verdes actúan como moduladores de los ciclos biogeoquímicos más que como agentes que transformación inmediata de las propiedades físicas del suelo [21]. En particular la mejora en variables asociadas a la fertilidad química puede atribuirse al aporte de compuestos orgánicos fácilmente mineralizables y a la estimulación de procesos de reciclaje de nutrientes, lo cual ha sido documentado en estudios que destacan el papel de las coberturas vegetales en el incremento de la eficiencia del uso de nutrientes [19], [20]. Sin embargo, la baja magnitud de cambios en atributos estructurales debe interpretarse con cautela, dado que estos procesos suelen requerir periodos prolongados de manejo continuo para manifestarse de manera consistente [5], [24].

El contraste con investigaciones previas pone de manifiesto que los efectos de los abonos verdes pueden variar ampliamente según el contexto ambiental. Mientras que algunos estudios reportan incrementos sustanciales en materia orgánica y mejoras en la estructura del suelo [19], [20], [21], otros señalan respuestas más modestas en condiciones de alta tasa de mineralización, donde la rápida descomposición limita la acumulación de carbono estable [5], [6]. En este sentido,

los resultados obtenidos aportan evidencia relevante al mostrar que, en sistemas con marcada estacionalidad hídrica, los beneficios pueden concentrarse en el corto plazo en la disponibilidad de nutrientes más que en cambios físicos del suelo [7].

Un aporte significativo de la presente investigación radica en su diseño que abarca múltiples localidades, lo que permite capturar la variabilidad espacial y evaluar la consistencia de los efectos bajo condiciones reales de producción [2]. Este enfoque fortalece la validez externa de los hallazgos y contribuye a reducir la brecha existente entre experimentos controlados y escenarios de manejo agrícola a escala territorial [18]. Asimismo, la integración de mediciones de biomasa y variables edáficas proporciona una perspectiva sistémica que facilita comprender los mecanismos mediante los cuales los abonos verdes influyen en la funcionalidad del suelo [7], [8], [16], [19].

La correlación positiva entre la producción de biomasa de *Z. mays* con el fósforo y el Zinc en la subregión norte coincide con las tendencias internacionales que resaltan el papel de los bioestimulantes y el manejo de residuos para aumentar la biodisponibilidad de nutrientes [27], no obstante, la menor sensibilidad observada en las subregiones Sur y Río se plantea una resiliencia ecológica que contrasta con sistemas altamente dependientes de insumos minerales en regiones templadas [28].

No obstante, los resultados deben interpretarse considerando ciertas limitaciones. La duración del periodo de evaluación puede haber sido insuficiente para detectar cambios en fracciones más recalcitrantes de la materia orgánica o en propiedades físicas de respuesta lenta [5], [24]. Adicionalmente, la variabilidad inherente a los sistemas de producción y posibles diferencias en prácticas de manejo entre sitios pueden introducir fuentes de incertidumbre que dificultan aislar completamente el efecto de los tratamientos [5]. La inclusión futura de indicadores biológicos, como la actividad microbiana o biomasa microbiana del suelo, permitiría profundizar en la comprensión de los procesos observados [6], [21].

La adaptabilidad de *C. juncea* como abono verde en zonas con condiciones edafoclimáticas heterogéneas refuerza la propuesta de [28] quienes sugieren que la fertilización orgánica puede superar a la mineral en términos de estabilidad del carbono en el suelo y rendimiento acumulado, promoviendo una agricultura circular necesaria para mitigar los efectos de la degradación edáfica en el trópico seco.

Desde la perspectiva conceptual, los hallazgos refuerzan la necesidad de considerar los abonos verdes como parte de estrategias integradas de manejo. Su efectividad depende de la sincronización entre liberación de nutrientes y la demanda de los cultivos, así como de su interacción con otros componentes del sistema como la fertilización y la gestión del agua. Este enfoque sistémico resulta especialmente relevante en regiones donde la degradación del suelo y la variabilidad climática representan desafíos importantes para la sostenibilidad agrícola.

Los resultados sugieren que la adopción de abonos verdes puede contribuir a mejorar la resiliencia de los sistemas productivos al favorecer el ciclaje de nutrientes y mantener las funciones del suelo bajo condiciones ambientales restrictivas. No obstante, la variabilidad en la respuesta observada indica que la selección de especies y la adaptación de las prácticas de manejo deben realizarse según las características locales, evitando extrapolaciones generalizadas.

Una limitación relevante que emerge al contrastar los resultados aquí obtenidos con estudios de mayor duración es la posible subestimación de los efectos sobre fracciones estables de carbono. Por ejemplo, [12] demostraron que los beneficios de los abonos verdes sobre el carbono orgánico asociado a minerales arcillosos solo son detectables tras 5-7 años de manejo en arrozales. Asimismo, [24] en un sistema de rotación arroz-cultivos de cobertura, reportaron mejoras significativas luego del tercer ciclo. El periodo de evaluación del presente estudio es comparable al de [16], quienes tampoco hallaron cambios en propiedades físicas, pero sí en indicadores químicos lábiles. Por tanto, es recomendable interpretar los cambios observados como efectos tempranos de la incorporación de la biomasa y se subraya que las mejoras estructurales y de carbono estable requerirá estudios longitudinales de al menos 5

años de seguimiento, lo que es apremiante en el Caribe seco colombiano, donde la temperatura y la estacionalidad hídrica aceleran la descomposición [7].

## 4. CONCLUSIONES

La implementación de abonos verdes (*Phaseolus vulgaris*, *Crotalaria juncea*, *Pueraria phaseoloides* y *Zea mays*) mostró efectos diferenciados sobre las propiedades edáficas en las distintas subregiones del departamento del Magdalena, Colombia. Si bien las propiedades físicas del suelo (textura, DA y H), fueron estables a lo largo del periodo de evaluación, se evidenciaron cambios significativos en la CE, lo que sugiere una respuesta del suelo a la incorporación de biomasa vegetal. Se encontraron correlaciones específicas entre la biomasa producida por diferentes especies de abonos verdes y pH, fósforo disponible, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe), y micronutrientes como Cu, Zn y Mn.

Crotalaria (*Crotalaria juncea*) se destacó como la especie más promisoria del grupo de estudio, alcanzando mayores niveles de producción de biomasa en tres de las cuatro subregiones evaluadas, sin mostrar dependencia crítica de condiciones edafoclimáticas específicas, lo cual la posiciona como una estrategia versátil para su implementación con aporte de biomasa y materia orgánica, lo que contribuye a la sostenibilidad de los agroecosistemas tropicales.

En contraste, especies como el kudzú (*Pueraria phaseoloides*) y el *P. vulgaris* (*Phaseolus vulgaris*) mostraron menor producción de biomasa y correlaciones negativas con ciertas variables edáficas, lo que indica una menor adaptación a suelos con limitaciones.

Los hallazgos encontrados refuerzan la importancia de diseñar estrategias agroecológicas adaptadas a las condiciones locales, priorizando la selección de especies de abonos verdes de acuerdo con los requerimientos edáficos y climáticos de cada subregión. Asimismo, se evidencia que los beneficios sobre las características edáficas requieren más tiempo de monitoreo e implementación para reflejar cambios significativos.

## 5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Artículo procedente del proyecto “Producción hortofrutícola derivadas de la emergencia económica, social y ecológica causada por el covid-19 en el departamento de Magdalena. E-COMMERCE financiado por el Sistema General de Regalías- Universidad del Magdalena BPIN 2020000100768. Gracias a los productores, al equipo de profesionales y consultores del proyecto.

## 6. REFERENCIAS

[1] A. Naorem *et al.*, “Soil Constraints in an Arid Environment—Challenges, Prospects, and Implications,” *Agronomy*, vol. 13, no. 1, p. 220, Jan. 2023. https://doi.org/10.3390/agronomy13010220

[2] S. Aguirre Forero, N. Piraneque, and J. A. Morón Cárdenas, “Desafíos del sector agrícola ante cambio climático en el Caribe seco colombiano,” *Intropica*, vol. 19, no. 1, pp. 35-52, Sep. 2024. https://doi.org/10.21676/23897864.5645

[3] Y. Quispe Conde, B. Locatelli, A. Vallet, and R. Blas Sevillano, “Agroecología para la seguridad alimentaria y frente al cambio climático en Perú,” *Econ. Agrar. Rec. Nat.*, vol. 22, no. 1, pp. 5-29, Jun. 2022. https://doi.org/10.7201/earn.2022.01.01

[4] N. Medina, and J. Vandermeer, “Developing systems theory in soil agroecology: incorporating heterogeneity and dynamic instability,” *Front. Environ. Sci.*, vol. 11, p. 1171194, Nov. 2023. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1171194

[5] A. Olasekan Adekiya, E. Temitope Alori, T. Oyebamiji Ogunbode, T. Sangoyomi, and O. Adosebe Oriade, "Enhancing Organic Carbon Content in Tropical Soils: Strategies for Sustainable Agriculture and Climate Change Mitigation," *Open Agric. J.*, vol. 17, no. 1, Dec. 2023. https://doi.org/10.2174/0118743315282476231124074206

[6] G. dos Santos Nascimento, T. A. F. de Souza, L. J. R. da Silva, and D. Santos, "Soil physico-chemical properties, biomass production, and root density in a green manure farming system from tropical ecosystem, North-eastern Brazil," *J. Soils Sediments*, vol. 21, no. 6, pp. 2203-2211, Jun. 2021. https://doi.org/10.1007/s11368-021-02924-z

[7] N. V. Piraneque Gambasica, S. E. Aguirre Forero, and A. R. Lucheta, "Green manure: Alternative to carbon sequestration in a Typic Ustipsamment under semiarid conditions," *Spanish J. Soil Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 293-305, Mar. 2018. URL

[8] J. C. Soares Mangaravite, R. R. Passos, F. Vaz Andrade, V. M. da Silva, E. Broetto Marin, and E. de S. Mendonça, "Decomposition and release of nutrients from species of tropical green manure," *Rev. Ceres*, vol. 70, no. 3, pp. 114-124, Jun. 2023. https://doi.org/10.1590/0034-737x202370030012

[9] J. Dessureault-Rompré, "Restoring Soil Functions and Agroecosystem Services Through Phytotechnologies," *Front. Soil Sci.*, vol. 2, p. 927148, Jul. 2022. https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.927148

[10] A. Maienza *et al.*, "Soil Quality Indicators in Agroecological Practices: Lessons From a Systematic Review of Long-Term Experiments," *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 76, no. 4, p. e70138, Jul. 2025. https://doi.org/10.1111/ejss.70138

[11] R. Yang, S. Song, S. Chen, Z. Du, and J. Kong, "Adaptive evaluation of green manure rotation for a low fertility farmland system: Impacts on crop yield, soil nutrients, and soil microbial community," *Catena*, vol. 222, p. 106873, Mar. 2023. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106873

[12] Y. Huang *et al.*, "Effects of long-term green manure application on organic carbon fractions and clay minerals and their interactions in paddy soil aggregates," *Plant Soil*, vol. 507, no. 1-2, pp. 109-126, Feb. 2025. https://doi.org/10.1007/s11104-023-06383-y

[13] G. J. Arone, R. Ocaña, A. Sánchez, P. J. Villadas, and M. Fernández-López, "Benefits of Crotalaria juncea L. as Green Manure in Fertility and Soil Microorganisms on the Peruvian Coast," *Microorganisms*, vol. 12, no. 11, p. 2241, Nov. 2024. https://doi.org/10.3390/microorganisms12112241

[14] A. Freidenreich, S. Dattamudi, Y. Li, and K. Jayachandran, "Influence of Leguminous Cover Crops on Soil Chemical and Biological Properties in a No-Till Tropical Fruit Orchard," *Land*, vol. 11, no. 6, p. 932, Jun. 2022. https://doi.org/10.3390/land11060932

[15] W. Bieluczyk *et al.*, "From overgrazed land to forests: assessing soil health in the Caatinga biome," *J. Environ. Manage.*, vol. 374, p. 124022, Feb. 2025. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.124022

[16] M. L. Pimentel *et al.*, "Green manure, a sustainable strategy to improve soil quality: a case study in an oxisol from northern Brazil," *Aust. J. Crop Sci.*, vol. 17, no. 6, pp. 488-497, Jun. 2023. https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.06.p3832

[17] S. E. Aguirre-Forero, N. V. Piraneque, and J. R. Vásquez-Polo, "Características edificas y su relación con usos del suelo en Santa Marta, Colombia," *Entramado*, vol. 14, no. 1, pp. 242-250, Jan.-Jun. 2018. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-38032018000100242

[18] M. A. Velandia Carreño, J. Forero Cortés, and I. Hernández Sánchez. *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras, Departamento del Magdalena escala 1:100.000*, Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia, and Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 2009. https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/81345

[19] Y. Kenjaev, and F. P. Davronova, "Study on the effect of the green manure application on soil fertility," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1142, no. 1, p. 012112, Mar. 2023. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1142/1/012112

[20] M. Islam, T. A. Urmi, S. Rana, M. S. Alam, and M. M. Haque, "Green manuring effects on crop morpho-physiological characters, rice yield and soil properties," *Physiol. Mol. Biol. Plants*, vol. 25, no. 1, pp. 303-312, Jan. 2019. https://doi.org/10.1007/s12298-018-0624-2

[21] H. Qi *et al.*, "Hybrid Soybean as Green Manure for Improving Soil Properties and Subsequent Crop Growth," *Agronomy*, vol. 14, no. 12, p. 2936, Dec. 2024. https://doi.org/10.3390/agronomy14122936

[22] N. Uphoff, and J. Thies. *Biological Approaches to Regenerative Soil Systems*, N. Uphoff, and J. Thies, Eds., 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2023. https://doi.org/10.1201/9781003093718

[23] I. D. J. Matos Viégas *et al.*, "Contribution of Pueraria phaseoloides L. in the Cycling of Macronutrients in oil Palm Plantations," *J. Agric. Stud.*, vol. 9, no. 3, p. 1-13, Aug. 2021. https://doi.org/10.5296/jas.v9i3.18577

[24] S. Marimuthu, M. Gunasekaran, M. Raju, and U. Surendran, "Green manuring–system of rice intensification–rice fallow pulses cropping system for enhancing the crop productivity and soil health: a sustainable farming solutions," *Paddy Water Environ.*, vol. 22, no. 4, pp. 629-645, Oct. 2024. https://doi.org/10.1007/s10333-024-00989-3

[25] W. da S. Fonseca, S. V. Martins, and P. M. Villa, "Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil," *Floresta Ambient.*, vol. 30, no. 1, p. e20220041, Jan. 2023. https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2023-0041

[26] B. Lei, J. Wang, and H. Yao, "Ecological and Environmental Benefits of Planting Green Manure in Paddy Fields," *Agriculture*, vol. 12, no. 2, p. 223, Feb. 2022. https://doi.org/10.3390/agriculture12020223

[27] W. S. Gibson, A. S. Ziobron, N. E. Olson, D. A. Neher, C. F. Smith, and V. I. Holden, "On-farm corn stover and cover crop residue recycling with biostimulant Re-Gen increases corn yields and resultant milk yields in multi-year dairy cattle farm trials," *Front. Agron.*, vol. 6, p. 1420311, Jun. 2024. https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1420311

[28] F. S. Pacheco *et al.*, "Towards sustainable aquaculture in the Amazon," *Nat. Sustain.*, vol. 8, no. 3, pp. 234-244, Mar. 2025. https://doi.org/10.1038/s41893-024-01500-w

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron de manera sustancial al concepto y diseño del estudio, la redacción del artículo y la revisión crítica del manuscrito en cuanto a su contenido intelectual importante.

Nelson Virgilio Piraneque Gambasica: Conceptualización, metodología, investigación, visualización, curación de datos, análisis formal, borrador original, revisión y edición, supervisión.

Sonia Esperanza Aguirre Forero: Conceptualización, análisis formal, redacción.

Lida Paola Pinzón Gómez: Conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, redacción: revisión y edición, recursos, gestión del proyecto.