



RELACIÓN ENTRE NUTRIENTES CON CARBONO, NITRÓGENO Y MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS DE LA ZONA BANANERA DE COLOMBIA

RELATIONSHIP BETWEEN NUTRIENT WITH CARBON, NITROGEN, AND ORGANIC MATTER IN SOILS OF BANANA ZONE IN COLOMBIA

Sonia Esperanza Aguirre Forero • saguirre@unimagdalena.edu.co
Docente Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.

Nelson Virgilio Piraneque Gambasica • npiraneque@unimagdalena.edu.co
Docente Ingeniería Agronómica, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.

Rosmery Cruz O'Byrne • rosmerycrusko@unimagdalena.edu.co
Ingeniera Agrónoma e Ingeniera Ambiental. Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.

Citación: Aguirre, S., Piraneque, N. y Cruz, R. (2022). Relación entre elementos nutrientes con carbono, nitrógeno y materia orgánica en suelos de la zona bananera de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(2), 93 – 111. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.5186>

RESUMEN

Contextualización: El adecuado balance de nutrientes y su relación con el cultivo permite un manejo sostenible del recurso edáfico, esto permite la disponibilidad de los nutrientes en el suelo y está condicionada por la concentración, la fijación y las pérdidas en el sistema.

Vacío de conocimiento: En el municipio de Zona Bananera no se ha identificado la concentración de nutrientes en el suelo y sus posibles relaciones con la fertilidad, lo que es de vital importancia para su manejo eficiente y el sostenimiento de la productividad del territorio.

Propósito: Por lo anterior, se planteó como objetivo analizar el pH y la concentración de macroelementos y microelementos, y su relación con contenidos de carbono oxidable (Cox), nitrógeno total (Nt) y materia orgánica (MO) en suelos del municipio de Zona Bananera, en el departamento de Magdalena, Colombia.

Metodología: Durante el año 2020, mediante muestreo aleatorio simple de 25 puntos a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm), se determinó la concentración de nutrientes (P, K, Ca, Mg, Na, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B y S) y su relación con Nt, MO y Cox, seguido de la priorización de alternativas para manejo sostenible mediante una matriz multicriterio con enfoque multidisciplinario.

Resultados y conclusiones: Se evidenció que los suelos cultivados presentan altos contenidos de MO y N, con correlación significativas con las variables medidas, ratificando que el contenido de Cox y MO incide sobre la fluctuación del N y otros nutrientes, por lo que el monitoreo de este elemento es primordial para sostenibilidad del sistema. 

Palabras clave: Nutrientes minerales; sostenibilidad; Materia Orgánica del suelo; Oligoelementos

ABSTRACT

Context: The adequate balance of nutrients and their relationship with the crop allows sustainable management of the edaphic resource, this allows the availability of nutrients in the soil and is conditioned by the concentration, fixation and losses in the system.

Knowledge gap: In the municipality of Zona Bananera, the concentration of nutrients in the soil and their possible relationships with fertility have not been identified, which is of vital importance for their efficient management and for sustaining the productivity of the territory.

Purpose: Therefore, the objective was to analyze the pH and the concentration of macroelements and microelements, and their relationship with oxidizable carbon (Cox), total nitrogen (Nt), and organic matter (OM) contents in soils of the municipality of Zona

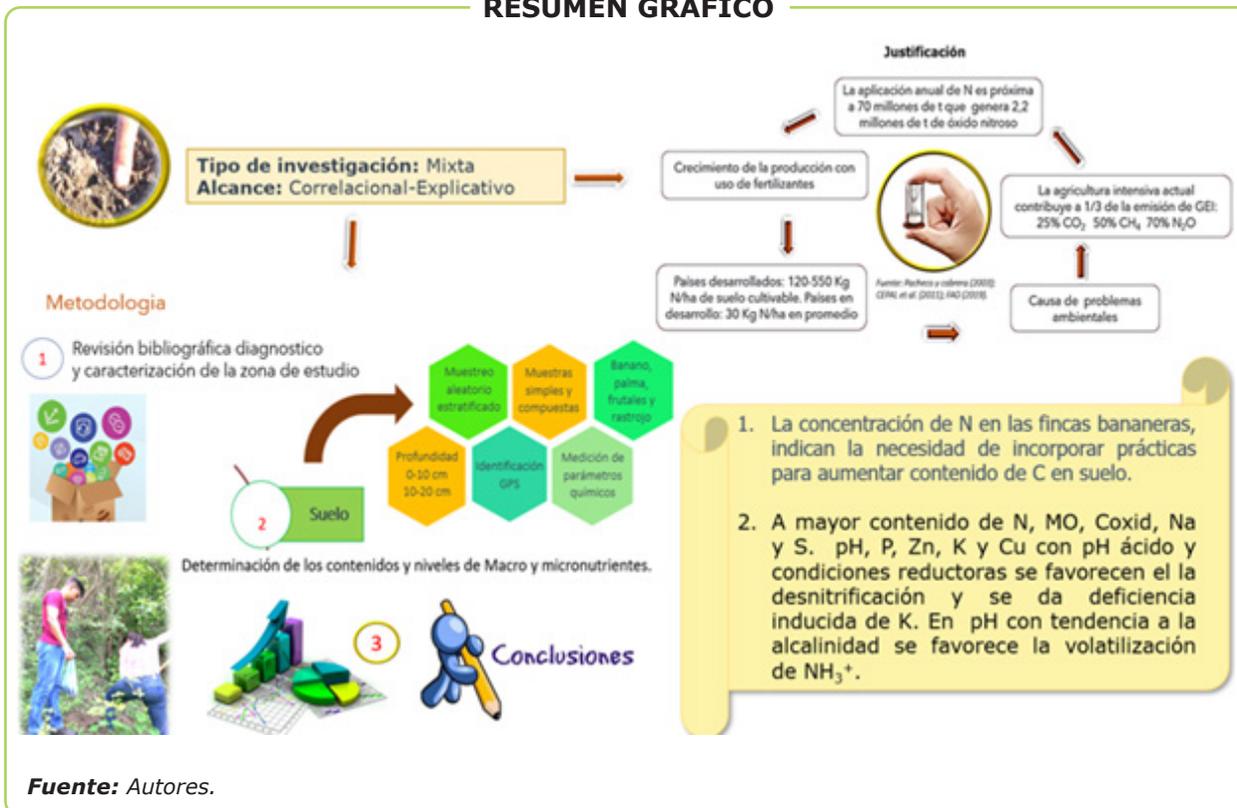
Bananera, in the department of Magdalena, Colombia.

Methodology: In 2020, by simple random sampling of 25 points at two depths (0-10 and 10-20 cm), the concentration of nutrients (P, K, Ca, Mg, Na, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B and S) and their relationship with Nt, OM and Cox were determined, followed by the prioritization of alternatives for sustainable management using a multi-criteria matrix with a multidisciplinary approach.

Results and conclusions: Cultivated soils showed high contents of OM and N, with a significant correlation with the variables measured, confirming that Cox and OM content affect the fluctuation of N and other nutrients, so the monitoring of this element is essential for the sustainability of the system. 

Keywords: Mineral nutrients; sustainability; Soil organic matter; trace elements

RESUMEN GRÁFICO





1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema que vincula relaciones bióticas y abióticas, esenciales en la nutrición vegetal. Las sustancias inorgánicas son absorbidas por la raíz; agua, dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y H; así como otros nutrientes minerales, como N, P, K, Ca, Mg, Bo, Zn, S, Na, esenciales en la nutrición vegetal. Estos son fundamentales para la producción agrícola y en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos (Cerón y Aristizábal, 2012; Aguirre et al., 2019, Aguirre, Piraneque & Ramírez, 2018). En consecuencia, la evaluación de la calidad del suelo, a través de indicadores físicos, químicos y biológicos, representa una herramienta clave para diagnosticar la concentración de elementos y de parámetros necesarios para establecer un plan de fertilización; así como para monitorear cambios en nutrición, la respuesta de la planta al nutriente y las condiciones agroclimáticas del área de estudio (Olivares et al., 2021).

Las investigaciones desarrolladas en suelos tropicales establecen que el detrimento de la fertilidad del suelo está sujeto a cambios en el uso y al tipo de explotación de este, los cuales repercuten directamente en la productividad del banano (Olivares, Araya-Alman et al., 2020; Olivares et al., 2022), cereales (Olivares, 2016), raíces y tubérculos (Olivares & Hernández, 2019), y otras frutas tropicales (Olivares, Pitti et al., 2020).

Con relación a las investigaciones realizadas en suelos tropicales, los trabajos más recientes concernientes a la calidad del suelo¹ en la zona de estudio de este artículo

son los de Aguirre et al.(2015), Aguirre, Piraneque y Ramírez (2018) y Aguirre, Piraneque y Vásquez (2018); allí se describen las principales características de los suelos bananeros y la importancia del enfoque de la calidad del suelo con la productividad y establece claramente la existencia de una relación entre la reducción de la productividad y la pérdida de la calidad del suelo, generada principalmente por el impacto adverso del sistema de producción convencional. S A pesar de esto, para mantener su importancia como región productora de banano, los productores están buscando métodos innovadores para administrar sus plantaciones con el fin de proteger áreas ambientalmente sensibles, reducir los impactos de los eventos climáticos y suprimir las enfermedades transmitidas por el suelo.

Por lo mencionado es preciso investigar el tema, debido a que el desarrollo de un suelo sano es una aspiración que se busca para abordar estas limitaciones. Para lograr esto se realizó esta investigación, utilizando indicadores basados en parámetros del suelo fácilmente medibles. Los objetivos principales del estudio fueron: (a) analizar la concentración de P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Bo, Zn, Mn, Fe y S del suelo; (b) establecer la relación de nutrientes con los contenidos de C, N y MO en el municipio Zona Bananera y (c) identificar cambios en la concentración de los elementos en el suelo e identificar posibles alternativas de manejo sostenible del área de estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. Noreste del departamento del Magdalena, municipio Zona Bananera (Figura 1); coordenadas $10^{\circ} 46' 00''$ Latitud Norte y $74^{\circ} 08' 00''$ Longitud Oeste, 20 m.s.n.m.; temperatura promedio de 27°C ; humedad relativa del 82 %. La evaporación media anual en la región es de 1500 mm/año y la precipitación media anual de 1371 mm/año. Esta zona posee un clima denominado Bosque seco Tropical (Bs-T) y Bosque muy seco Tropical (Bms-T), según las zonas de

1. Respecto a los estudios sobre calidad del suelo, se han encontrado los siguientes hallazgos: El nitrógeno (N) en el suelo se distribuye en el perfil y se estima que más del 90 % corresponde a formas orgánicas obtenidas a partir de la degradación de los residuos (Zapata y Osorio, 2010), es un nutriente esencial, y es absorbido como nitrato y amonio a través de las raíces; El nitrato es la forma más móvil, por lo que se lixivia con facilidad, y el amonio es fácilmente volatilizado, según condiciones climáticas y características edáficas (Barberena et al., 2019). Así mismo, la deposición y descomposición de materia orgánica es transcendental en la estabilización y el contenido de carbono del suelo (COS) (Lal, 2004, 2016); cuando el C es liberado a la atmósfera como CO_2 o metano (CH_4) incide en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), lo que acrecienta el denominado cambio climático (Manabe, 2019; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2015). Por otro lado, la agricultura responde por 25 % de las emisiones de CO_2 , el 50 % de CH_4 y el 70 % de emisiones de N_2O a nivel mundial, lo que causa un deterioro del COS y también reduce la fertilidad del suelo (FAO, 2015), disminuye las funciones ecológicas y

de producción (absorción y disponibilidad de nutrientes, regulación de los ciclos biogeoquímicos, ciclaje de materia orgánica (MO), flujo gaseoso, filtración y amortiguación impactos, entre otros). La producción agrícola, por tanto, depende de la capacidad del suelo para sostener los cultivos y de la sostenibilidad de este (Aguirre, et al., 2018, 2015; Olivares et al., 2022).

vida de Holdridge, con régimen de estaciones bimodal (Aguirre et al., 2015). El territorio tiene influencia de los ríos Tukurinca, Sevilla y Frío, los cuales proveen de agua a los distritos de riego. En zonas bajas, aledañas a la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), el nivel freático es superficial, con inundación en temporada de lluvia y presencia de salinidad en zonas aledañas a la CGSM. La mayor parte de los suelos del municipio son de origen aluvial, profundos (más de 1 metro), con drenaje pobre (regular a bueno), texturas francas (franco arcillosas y arenosas), pH entre 6 y 7, fertilidad moderada y contenidos variables de materia orgánica. Los suelos contienen áreas adecuadas para la producción de banano (*Musa sp.*), palma de aceite (*Elaeis guineensis*), arroz (*Oryza sativa*), cacao (*Theobroma cacao*) y café (*Coffea arabica*), entre otros (Instituto Geográfico Agustín

Codazzi [IGAC], 2009; Aguirre et al., 2012; Aguirre et al., 2015).

Muestreo y caracterización analítica.

Con la información referente a las características fisiográficas, edáficas, cobertura vegetal (uso) y manejo, a partir de un muestreo aleatorio simple se definieron 25 puntos de muestreo que corresponden a cultivos (banano, palma africana), árboles frutales como cítricos (*Citrus sp.*), cacao (*T. cacao*), mango (*M. indica*) y áreas de rastrojo (Tabla 1). Los puntos fueron georreferenciados y se recolectaron muestras de suelo a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm) por triplicado, estas fueron debidamente empacadas, rotuladas y preparadas para su posterior análisis químico, con los métodos descritos en la Tabla 2, por el Laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT.

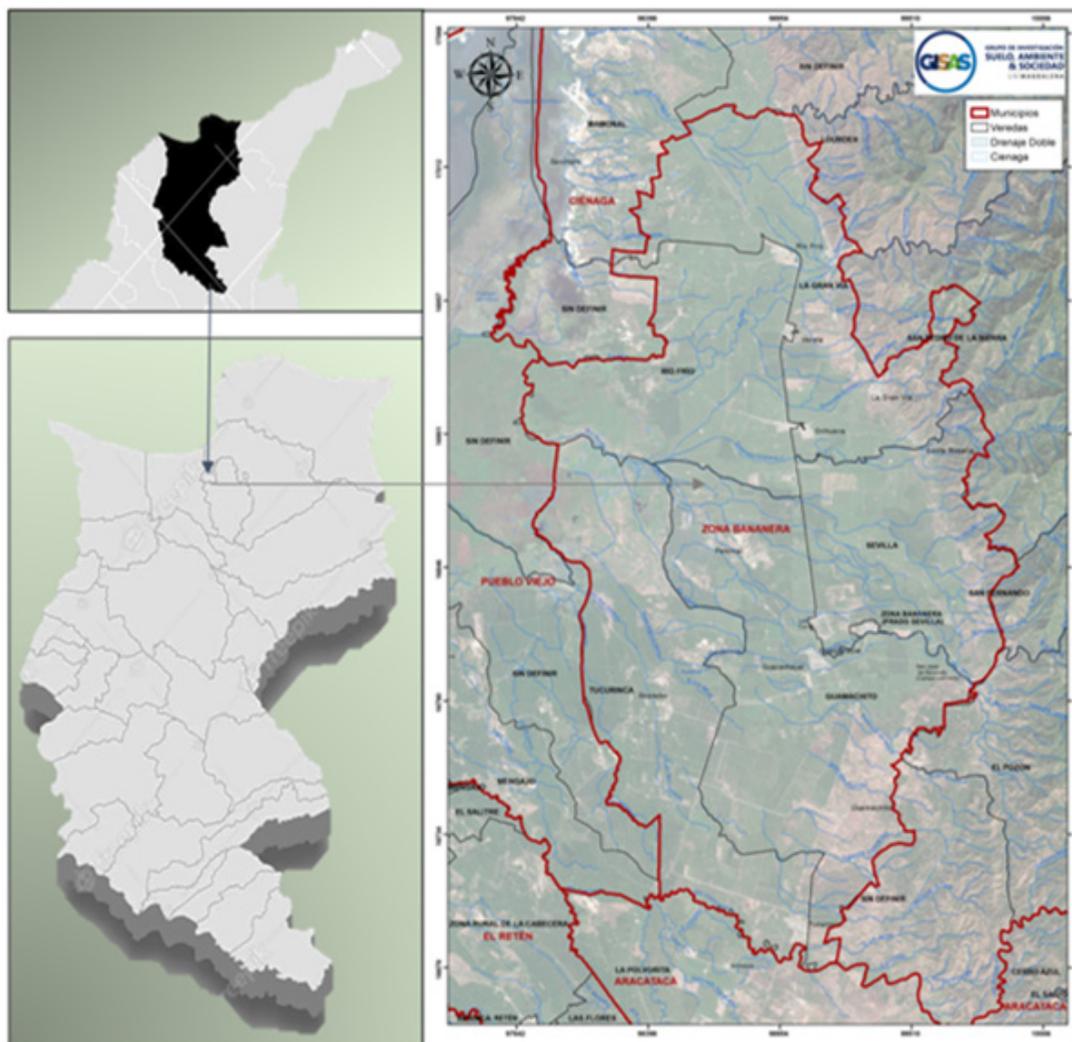


Figura 1. Localización del proyecto en el Municipio Zona Bananera, departamento de Magdalena, Colombia.

Fuente: Autores



Tabla 1. Localización de los sitios de muestreo para suelo (S: cultivo de banano, palma y frutales; L: vegetación de rastrojo) a dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm) en la Zona Bananera, Colombia.

Punto	Nº	Predio	Longitud	Latitud
S1	1	Finca Julio Zawady	-74, 91409	10,542593
S2	2	El Reposo	-74,1676361	10,9364545
S3	3	Vereda La Mira (punto 1)	-74,2074722	10,9223309
S4	4	Vereda La Mira (punto 2)	-74,2076222	10,9224778
S5	5	Límite Zona Bananera	-74,1446833	10,8828300
S6	6	San Pablo	-74,1490667	10,8812167
S7	7	La Unión	-74,1935833	10,8770083
S8	8	Límites Río Frío y Zona Bananera	-74,2613611	10,8683889
S9	9	La Candelaria	-74,2343944	10,8557556
S10	10	Finca María Luisa	-74,2018444	10,8505167
S11	11	Vereda Orihueca	-74,1936444	10,8460944
S12	12	Finca Plantación	-74,1354361	10,8497722
S13	13	La Gran Vía (punto 1)	-74,1320722	10,8520333
S14	14	La Gran Vía (punto 2)	-74,1309556	10,8527333
S15	15	La Gran Vía (punto 3)	-74,1306167	10,8531417
S16	16	Santa Rosalía (punto 1)	-74,0983611	10,8322778
S17	17	Santa Rosalía (punto 2)	-74,1119722	10,8251389
S18	18	Finca Vijagual	-74,1635944	10,7784222
S19	19	Finca Porvenir	-74,1221778	10,7517028
S20	20	Soplador	-74,2124417	10,7313944
S21	21	Tucurínca	-74,1908222	10,6648667
L*1	22	Finca Julio Zawady	-74,1539139	10,9072028
L*2	23	Vía San Pedro de la Sierra	-74,1444889	10,8809472
L*3	24	Desembocadura CGSM	-74,3255167	10,8709917
L*4	25	Guamachito	-74,1438167	10,698875

Fuente: autores

Tabla 2. Parámetros medidos y métodos empleados para determinar la concentración de elementos nutrientes en los suelos del municipio de Zona Bananera.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Método
pH			pH Agua 1:1
Nitrógeno total	N-total	g/kg	Espectrofotometría UV-VIS (Equipo -Skalar)
Carbono oxidable	Cox	g/kg	Carbono Oxidable Walkley & Black
Materia orgánica	MO	g/kg	M. Orgánica W-Black Espectrometría
Fosforo	P ₂ O ₅	mg/kg	BrayII. Fosforo disponible - Espectrometría
Potasio	K	cmol/kg	Potasio Intercambiable (Abs. At.).
Calcio	Ca	cmol/kg	Calcio Intercambiable (Abs. At.).
Magnesio	Mg	cmol/kg	Magnesio Intercambiable (Abs. At.).
Sodio	Na	cmol/kg	Sodio Intercambiable (Abs. At.).
Hierro	Fe	mg/kg	Hierro Extracto. Doble Acido (Abs. At.).
Manganeso	Mn	mg/kg	Manganeso Extracto. Doble Acido (Abs. At.).
Cobre	Cu	mg/kg	Cobre Extracto. Doble Acido (Abs. At.).
Zinc	Zn	mg/kg	Zinc Extracto. Doble Acido (Abs. At.).
Boro	Bo	mg/kg	Boro en Agua Caliente (Espectrómetro)
Azufre	S	mg/kg	Azufre Extracto (Fosfato Ca) Turbidimetría

Abs. At.: Absorción atómica. Fuente: Autores

Una vez determinadas las concentraciones de elementos químicos del suelo, se compararon con los parámetros estándar (Tabla 3) con el propósito de definir rangos de concentraciones de elementos (alto, medio, bajo), y así diagnosticar relaciones entre nutrientes que afecten los contenidos de MO, Ntotal y Cox-

Tabla 3. Rangos de pH, MO y nutrientes del suelo. Valores de referencia ICA (1992).

Elemento	Símbolo	NIVEL			
		Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Nitrógeno (%)	N	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,3	>0,4
Fósforo (mg/kg)	P	< 4 – 8	8 – 13	13 – 21	>21
Calcio (cmol ₊ /kg)	Ca	< 3	3 – 6	> 6	
Magnesio (cmol ₊ /kg)	Mg	< 1.5	1.5 -2.5	> 2.5	
Potasio (cmol ₊ /kg)	K	< 0.20	0.2 -0.4	>0.40	
Sodio (cmol ₊ /kg)	Na			> 1.0	
Boro (mg/kg)	B	< 0.20	0.20 -0.40	> 0.40	
Cobre (mg/kg)	Cu	< 1.0	1.0 -3.0	> 3.0	
Hierro (mg/kg)	Fe	< 25	25 -50	> 50	
Manganeso (mg/kg)	Mn	< 5	5.0 -10.0	> 10.0	
Zinc (mg/kg)	Zn	<1.5	1.5 -3.0	> 3.0	
Materia Orgánica (%)	Frío	< 5	5 – 10	>10	
	Medio	< 3	3 – 5	>5	
	Cálido	< 2	2 – 3	> 3	
pH (Unidades)	< 4,5		Extremadamente ácido		
	4,6 – 5,0		Muy fuertemente ácido		
	5,1 – 5,5		Fuertemente ácido		
	5,6 – 6,0		Medianamente ácido		
	6,1 – 6,5		Ligeramente ácido		
	6,6 – 7,3		Neutro		
	7,4 – 7,8		Ligeramente alcalino		
	7,9 – 8,4		Medianamente alcalino		
	8,5 – 9,0		Fuertemente alcalino		
	> 9,0		Extremadamente alcalino		

Fuente: Adaptado de ICA, 1992.

Análisis de datos. Se construyó una matriz de datos y se empleó análisis de varianza (ANOVA) con el fin de determinar las diferencias entre los puntos muestreados. Se empleó la prueba de Levene para evaluar la igualdad de varianzas y la prueba estadística de Shapiro-Wilk para probar la distribución normal

de cada característica. En aquellas situaciones en las que se detectó diferencias significativas en las variables medidas se aplicó, *post hoc*, la prueba HSD de Tukey para la comparación de medias con nivel de significancia de 0,01. A fin de determinar la asociación entre variables, se procedió a una interpretación gráfica y



numérica. A su vez, para la caracterización de las fincas (predios) y profundidades de muestreo se utilizaron técnicas multivariadas tales como: el análisis de componentes principales (ACP), análisis de conglomerados y análisis de correlación canónica, ampliamente utilizados y descritos en las ciencias agrícolas y ambientales por Olivares y Hernández (2019), Olivares & Zingaretti (2019) y Olivares & Hernández (2020).

Con el fin de centrar los análisis en los parámetros químicos del suelo, que formaron gradientes importantes en el área de estudio, se calculó un análisis de componentes principales (ACP) utilizando el criterio de Keizer-Meyer-Olkin (KMO) (Olivares et al., 2017); se verificó la adecuación del muestreo y la aplicabilidad del ACP se validó mediante la prueba de esfericidad de Bartlett (Dalal et al., 2010). Posteriormente, los componentes principales (CP) se giraron mediante rotación Varimax (Tabachnick & Fidell, 2007), de modo que los varifactores (VF) fueran ortogonales y no se correlacionaran entre sí.

Solo los factores con valores propios superiores a uno se tuvieron en cuenta para determinar las cargas de los factores. La clasificación de los puntos de muestreo en los suelos se llevó a cabo mediante análisis de conglomerados sobre las propiedades, a cada profundidad analizada. Los conglomerados se ajustaron mediante agrupamiento jerárquico con

el criterio de Ward utilizando la función *hclust* en R y se seleccionaron tres conglomerados como la división más apropiada según el árbol jerárquico (Murtagh & Legendre, 2011). La correlación de los conglomerados con los grupos de hábitats se calculó mediante la prueba de chi cuadrado (χ^2) y todos los análisis estadísticos se realizaron con el software estadístico R versión 3.6.1 (R Core Team, 2019).

Priorización de alternativas para manejo de los suelos de la zona. Las alternativas propuestas se establecieron de acuerdo con los resultados, la proyección y tendencia agroclimáticas de la zona de estudio (según los escenarios de adaptación al cambio climático del departamento del Magdalena). Se contó también con la valoración de veinte expertos (académicos, investigadores) y veinte productores activos en la zona de estudio, preferencialmente en cada sistema productivo desarrollado (la proporción experto/productor se seleccionó a fin de mantener un adecuado nivel de confianza), a través de una matriz multicriterio (Barati et al., 2019). Esta matriz fue un instrumento de apoyo para la planificación agrícola y la toma de decisiones, permitió precisar e identificar criterios discriminantes, trabajar multidisciplinariamente y estructurar subcriterios para definir categorías y ponderar. En la tabla 4 se observan las variables priorizadas y analizadas.

Tabla 4 Principales variables del análisis estructural

Variables evaluadas	
Condiciones climáticas	Temperatura y humedad
Infraestructura de riego	Distritos de riego y disponibilidad de agua
Características de suelo	Geomorfología, pH, concentración de macronutrientes y micronutrientes
Prácticas agrícolas	Sistema del cultivo, uso, manejo y gestión del suelo.
Servicios ecosistémicos	Seguridad alimentaria y Biodiversidad
Producción y características socioeconómicas	Productividad asociatividad y comercialización de productos

Fuente: Los autores

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 5 se aprecian los resultados del análisis de varianza y en la figura 2, las diferencias significativas de los parámetros

analizados a dos profundidades obtenidas de todas las 25 muestras de suelo de los predios a partir de la caracterización analítica de los suelos de estudio.

Tabla 5. Resultados del Análisis de varianza de las variables analizadas en suelos del Municipio Zona Bananera.

Variable	FV	GL	SC	F	p
pH	Pred	24	40,52	8,7	***
	Prof	1	0,91	4,67	**
Cox	Pred	24	16955,35	41,78	***
	Prof	1	192,04	11,36	**
MO	Pred	24	3759,2	2,24	*
	Prof	1	720,94	10,29	**
P	Pred	24	874323,33	5,73	***
	Prof	1	31316,89	4,93	*
Ca	Pred	24	360,53	6,13	***
	Prof	1	18,74	7,64	*
Mg	Pred	24	50,05	2,5	*
	Prof	1	6,58	7,9	**
K	Pred	24	4910,28	377,31	***
	Prof	1	2,95	5,45	*
Na	Pred	24	66,84	10,06	***
	Prof	1	0,15	0,56	NS
Fe	Pred	24	19198,51	9,04	***
	Prof	1	363,74	4,11	NS
Mn	Pred	24	27507,12	2,53	*
	Prof	1	126,27	0,28	NS
Cu	Pred	24	1529,23	4,19	***
	Prof	1	1,08	0,07	NS
Zn	Pred	24	1778,13	3,77	***
	Prof	1	151,14	7,70	*
B	Pred	24	11,55	3,18	**
	Prof	1	0,49	3,21	NS
S	Pred	24	64575,06	17,71	***
	Prof	1	149,57	0,98	NS
Ntotal	Pred	24	74,28	2,24	*
	Prof	1	0,01	3,8E-03	NS
NH ₄	Pred	24	1134,82	1,82	NS
	Prof	1	40,93	1,58	NS
NO ₃	Pred	24	19779,78	6,08	***
	Prof	1	2983,1	22,0	***

Pred: Predio. Prof: Profundidad. *Significativo al nivel de probabilidad de 0.05

** Significativo al nivel de probabilidad de 0.01. ***Significativo al nivel de probabilidad de 0.001.

Fuente: Los Autores.

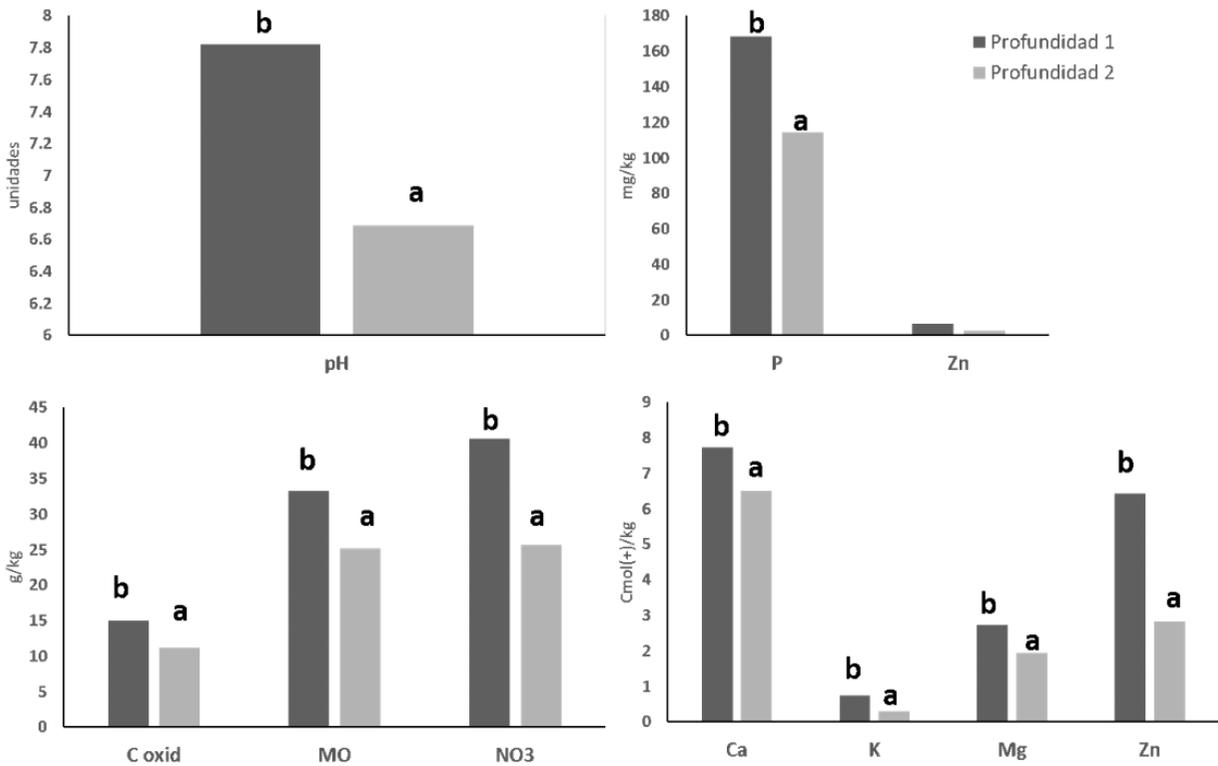


Figura 2. Resultados del análisis de comparación de medias con diferencias significativas de los parámetros analizados a dos profundidades obtenidas de las 25 muestras de suelo de los predios.

Fuente: Autores.

La caracterización analítica del suelo, respecto al pH, mostró diferencias significativas entre predios ($p < 0,01$) y en profundidad. El comportamiento de la variable osciló de extremadamente ácido (4,64) a medianamente alcalino (8,03); normal en suelos provenientes de fragmentos de rocas del piedemonte, con alturas inferiores a los 500 m. s. n. m., con temperatura mayor a 24 °C y una precipitación anual de 1 000 a 2 000 mm. Todos estos factores inciden en las diferentes asociaciones de suelos presentes en el municipio (IGAC, 2009). Debe tenerse en cuenta que, cuando el pH es alcalino, el Ca reacciona con P formando fosfatos de calcio insolubles, lo que limita la producción (Do Nascimento et al., 2018), por lo que es necesario estar atentos a síntomas visuales de deficiencia de P en la planta.

El contenido de MO en los suelos, en clima tropical, es fluctuante y su clasificación es compleja al ser una mezcla heterogénea de componentes biogénicos, en proporciones y estados evolutivos variables (Assunção et al., 2019). Los resultados evidencian diferencias significativas respecto a la

profundidad y predios ($p < 0,01$); 24 % de las muestras reportaron rango medio de MO, 40 % presentaron contenidos altos y 36 %, contenidos bajos. La muestra de rastrojo, recolectada cerca de CGSM, presentó diferencias significativas respecto a las demás; el contenido es alto, posiblemente es un sitio que acumuló sedimentos y materiales vegetales. Los valores más bajos se reportaron en los puntos de muestreo de Santa Rosalía, con profundidad 1 y 2. En general, se evidenció un rango medio a alto en el 64 % de las muestras, a pesar de haberse cultivado por años, posiblemente por la práctica de abandonar los desechos (hojas) en la superficie de los suelos bananeros, lo que incorpora MO al suelo.

El contenido N total evidenció diferencias significativas ($p < 0,05$) entre predios. En la profundidad 1 (0 -10 cm), los contenidos variaron de bajos a medios; y para la profundidad 2, la concentración de N disminuyó. En la mayoría de las muestras se reportaron contenidos medios, y algunas del noreste y sureste del municipio presentaron contenidos bajos. En general, coincide con

lo evidenciado por Vásquez et al. (2013), quienes encontraron que en la Zona Bananera se presentan contenidos medios de N total y MO.

Respecto al contenido de fósforo (P) en suelo, se evidenciaron diferencias significativas entre predios ($p < 0,01$) y profundidades. Se encuentra en rangos altos a muy altos (96 %). Sin embargo, esto no significa que esté disponible para la planta, pues el P es absorbido principalmente como ion orto fosfato ($H_2PO_4^-$) y ion fosfato secundario ($HPO_4^{=}$); además, su absorción y forma dependen del pH y la simbiosis con micorrizas, entre otros factores.

El potasio (K) en las plantas regula la presión osmótica y capacidad iónica de la solución, está involucrado en la actividad de más de 80 enzimas, translocación de asimilados, y absorción de N. En el cultivo de banano este elemento es primordial, al ser el catión de mayor concentración en las células de la especie, y su respuesta a la fertilización es significativa en la producción, por lo que los productores lo aplican de forma abundante como cloruro o Nitrato. Se evidenciaron diferencias significativas respecto a la profundidad y los predios: el 50 % de los datos se localizaron en rango medio, el 42 %, rango alto y el 8 % presentaron un rango bajo, coincidiendo con predios de rastrojo; lo que evidencia que este elemento es agregado.

El Ca presentó diferencias significativas respecto a predio ($p < 0,01$) y profundidad. Los resultados reportaron que el 64 % de las muestras tienen concentraciones altas; el 32 %, rangos medios; y 4%, rangos bajos, localizados principalmente en rastrojos. El calcio es abastecido a las raíces vía flujo masal o intercepción, y constituye las paredes y membranas celulares, regula enzimas y cuando hay deficiencia reduce la disponibilidad de P; resultando en menor crecimiento de raíces y el desarrollo de la planta.

El Mg mostró diferencias significativas respecto a la profundidad y los predios ($p < 0,05$). El 87 % de los datos se localizaron en rango medio, 8% evidenció bajas concentraciones y el 5 %, concentración

alta. Este elemento constituye la clorofila, los ribosomas (síntesis proteica) y se asocia a reacciones de transferencia de energía (ATP). Una baja concentración de Mg en forrajes causa hipomagnesemia, en especial en gramíneas (compite con K y NH_4^+), mientras que en banano las necesidades del Mg no son altas (García, 2015), sin embargo, es necesario en la producción y en las relaciones sinérgicas de la planta. Como se señaló anteriormente, el análisis puede proporcionar una visión general de las variables clave que podrían estar obstaculizando la productividad del banano. Según los resultados de Olivares, Araya-Alman et al. (2020) los niveles de Mg fueron moderados a bajos en todas las parcelas muestreadas, pero siempre más bajos en las parcelas de alta productividad, lo que indica que puede haber problemas de equilibrio nutricional y absorción de estos nutrientes por parte de las plantas.

El Na, a diferencia de los anteriores elementos, no está probado como nutriente esencial, pero puede sustituir al K en ciertas funciones (da turgencia). Es un elemento relacionado al exceso (> 15 % de la CIC) y afecta la estructura del suelo. Presentó diferencias significativas respecto a los predios (con exceso hacia rastrojo, cercano a la CGSM) y 5 % de las muestras poseen alto contenido de este, probablemente porque las muestras recolectadas en cercanía de la CGSM presentan capas freáticas salinas, que entran en el perfil de manera esporádica; no obstante, también hay causas antrópicas (riego con agua de pozo o mal manejo de fertilizantes, entre otros).

Otro de los factores que afectan la disponibilidad de las bases, además del pH, es el tipo de coloides, el CIC y la relación entre cationes de saturación (antagónicas o sinérgicas). Así, la disponibilidad de estos nutrientes define en buena parte, el grado de fertilidad del suelo, por lo que es preciso estimar concentración y posibles relaciones.

El S reportó diferencias significativas respecto a los predios ($p < 0,001$). Su concentración tiene rango medio, exceptuando algunos puntos de muestreo que presentan contenidos altos de 161 y 52,83 mg/kg. El nivel crítico de S es de 12 mg/kg; de 12 - 20 se considera contenido medio; de 20 a 50, óptimo; y > 50 alto. Es un elemento limitante



en suelos de origen aluvial, con contenidos altos en Ca y Mg, y con baja concentración de materia orgánica (Bertsch, 1986).

Los microelementos son fundamentales para las plantas e inciden en la productividad y calidad de los alimentos. Son requeridos en cantidades mínimas y hacen parte de diversos sistemas enzimáticos de las plantas. De acuerdo con Vázquez (2005), los micronutrientes responden a las características geofísicas del suelo, donde el pH y a las condiciones ambientales son fundamentales en la disponibilidad. Al respecto, la concentración de B y Zn evidenció diferencias significativas entre predios ($p < 0,01$). El B se mostró 74 % en rango alto; 16%, bajo; y 10%, medio. Este microelemento es fundamental en la síntesis de almidón y suele aplicarse en cultivos de banano. Por otra parte, el Zn se presentó 38 % en un rango alto, 30 % en un rango medio y 32 %, bajo. Se destaca que la síntesis de triptófano y lípidos depende de la concentración de este elemento, siendo esencial en el metabolismo de los vegetales.

Otros microelementos, como Fe, Cu y Mn, presentaron diferencias significativas respecto a los predios ($p < 0,05$). Cu se reportó en un 65 % de las muestras en un rango alto; 26 %, en medio y 9 %, en rango bajo. Es posible que este elemento se agregue a través de fungicidas o provenga de la meteorización de rocas y minerales. Para Fe, el 91,6 % de las muestras están en rango bajo, mientras el 8,3 % de las muestras presentan un rango alto. El Fe es fundamental en fotosíntesis, respiración y síntesis de ADN y su disponibilidad está guiada principalmente por los rangos de pH. Para Mn, el 90 % de las muestras enseñan un rango alto y el 10 %, uno medio. El Mn es un elemento importante para la síntesis de clorofila.

Los métodos univariados consideran elementos individuales, pero no detectan la interacción dinámica de los elementos propios de la mineralización del suelo. Por lo anterior, se recurrió a técnicas multivariadas para definir agrupaciones y su relación. El análisis de componentes determinó "factores comunes" que explican un porcentaje de la varianza total, mientras que el análisis clúster consideró la correlación de los datos en términos de similaridad entre las observaciones.

Los resultados obtenidos del análisis de componentes principales [ACP], para la profundidad 1 (0 a 10 cm), se observan en la Figura 3. El análisis realizado permitió asociar los predios con las variables que mejor los caracteriza. La varianza explicada por los dos primeros componentes (inercia) fue de 44,6 % y mostró parámetros significativos de ordenación. El análisis permitió determinar que cinco componentes explican el 80 % de la variabilidad (autovalor > 1). El PC1 indicó mayor variabilidad entre las propiedades pH y P con Mo y Cox a su vez, en el PC2 fueron Cox, Mo, Ca, y B. En los dos componentes, las variables con mayor variabilidad fueron pH, P, Zn Cox, MO y B. En A se muestra la agrupación de los predios, y en B se verifica la relación a través de la proyección vectorial de las variables medidas y los grupos. El análisis de conglomerados organizó de manera útil los patrones jerárquicos de similitud en el conjunto de datos, lo que permitió identificar tres grupos (X^2 , $p < 0.001$):

Los predios ubicados en el grupo I, están asociados a los mayores contenidos de N, MO, Coxid, Na y S. pH, P, Zn, K y Cu. Los suelos de este grupo se caracterizan por tener pH ácido, con condiciones reductoras que favorecen el proceso de desnitrificación, además de presentar desbalance nutricional. Esto señala una deficiencia inducida de nutrientes, especialmente de K por exceso de Ca o Mg, como lo afirman Wang & Wu (2017); o por las condiciones ambientales de la zona marcadas por altas temperaturas (> 28 °C), elevada evapotranspiración (> 2 000 mm) y altos contenidos de sales (> 4 d S/m) (Hasanuzzaman et al., 2018).

Los predios ubicados en el grupo II presentan fuerte relación con las variables Mg, Ca, K, Zn, Mn, Cu y pH. El pH para este grupo fue alcalino, que unido a las altas temperaturas (28 - 36 °C) de la zona favorece la volatilización del N en forma de NH_3^+ ; esta hoy en día es reducida mediante el uso de inhibidores de ureasa (Barberena et al., 2019). Los elevados contenidos de Ca y de P suponen la formación de compuestos insolubles ($Ca_3(PO_4)$), con la consiguiente deficiencia en el aporte para la nutrición de las plantas. Igual que en el grupo anterior, se presentan relaciones que permiten verificar una deficiencia inducida, principalmente de K por efecto del exceso de Ca.

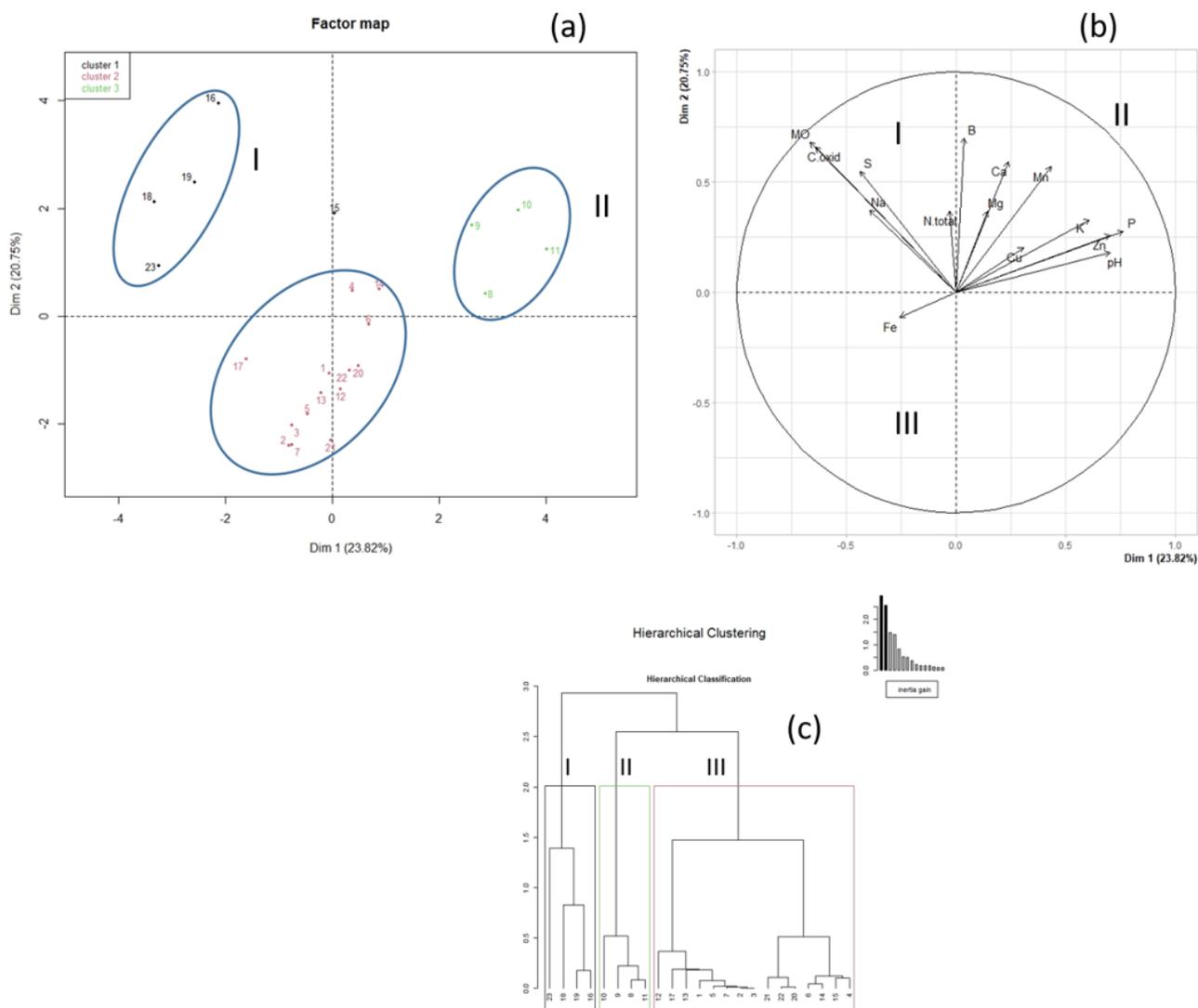


Figura 3. Ordenación de los puntos de muestreo (0 - 10 cm) de suelos en función a las variables en el municipio Zona Bananera del departamento del Magdalena. (a) nivel de relación lineal entre predios basada en las diferentes muestras, (b) proyección vectorial de las variables medidas, (c) agrupación de los predios en función a las variables. **Fuente:** autores

En el grupo III hay una relación fuerte con el elemento Fe y se marca una tendencia hacia el cuadrante inferior de la gráfica. Su reacción es ácida, lo que puede generar deficiencias nutricionales, principalmente de macroelementos como P, Ca, Mg y K.

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos del análisis de componentes principales ACP en la profundidad 2. El análisis permitió asociar predios con las variables que mejor los caracteriza. La varianza, explicada por los dos primeros componentes (inercia), fue de 41,6 % y mostró parámetros significativos de ordenación. El análisis permitió determinar que cinco componentes explican el 79 % de

la variabilidad (autovalor > 1). El CP1 indicó la mayor variabilidad entre las propiedades Ca, Mg y Fe; y el CP2, entre Cox, MO con Na y Mn. En los dos componentes, las variables con mayor variabilidad fueron Ca, Mg, Cox y MO. En A se muestra la agrupación de predios y en B se verifica la relación a través de la proyección vectorial de las variables medidas y los grupos (X^2 , $p < 0.001$).

El grupo I mostró pH ácido con déficit de MO y bajos contenidos de N disponible ($p < 0,01$), altos contenidos de P, pero con baja solubilidad, y regular disponibilidad de Ca y Mg; lo que supone deficiencias nutricionales para las plantas y altos contenidos de Cu,



Fe y Mn. El grupo II presentó pH alcalino, contenidos medios de MO y bajos de N disponible ($p < 0,01$), posiblemente debido a las condiciones ideales para la volatilización. También altos contenidos de Ca que, unidos

a los de P, dan lugar a la formación de compuestos insolubles ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), al igual que de carbonatos insolubles de Ca, Mg y microelementos, generando problemas nutricionales.

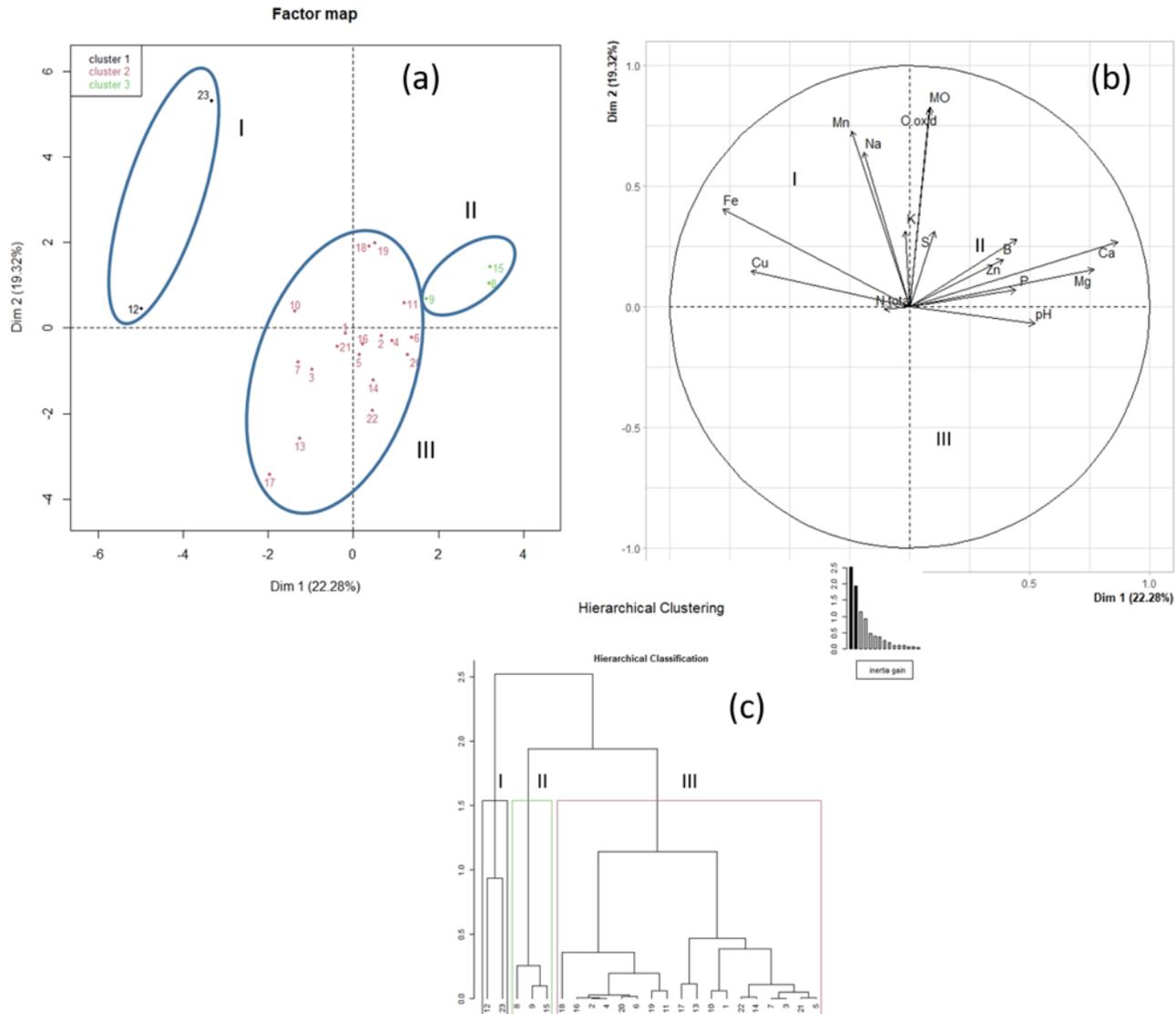


Figura 4. Ordenación de los puntos de muestreo (10-20 cm) de suelos en función a las variables Zona Bananera. (a) nivel de relación lineal entre predios basada en las diferentes muestras, (b) proyección vectorial de las variables medidas, (c) agrupación de los predios en función a las variables. **Fuente:** Autores

El grupo III, con pH prácticamente neutro, mostró medios contenidos de MO y bajos de N inorgánico ($p < 0,01$), de los que se puede esperar moderada disponibilidad de P. En la figura 5 se observan relaciones entre el conjunto de variables medidas en cada profundidad. El color azul significa asociación positiva y el rojo, inversa o negativa. En la profundidad 1 (0 - 10 cm), el Cox y la MO se correlacionaron negativamente ($p < 0,01$) con el pH, sugiriendo incrementos en los

parámetros medidos a medida en que el pH se torna ácido; A su vez, el Cox y la MO se relacionaron positivamente con P, Ca, Mg, K, Mn, Cu y S.

Lo encontrado permite verificar el papel de la materia orgánica en la retención y estabilidad de los elementos en el suelo, y en la disponibilidad (movilidad) de éstos hacia las plantas (Wiatrowska & Komisarek, 2019); toda vez que la biodisponibilidad de nutrientes,

principalmente de los microelementos, está influenciada por las propiedades físicas del sistema suelo (Olivares et al. 2022) y estas, a su vez, por el contenido de materia orgánica del mismo (Kebonye, et al., 2020), lo que resulta de vital importancia para el correcto funcionamiento de los ecosistemas, en los que el secuestro y la emisión de gases efecto invernadero cobran especial atención (Ondrasek et al., 2019). Lo encontrado sugiere que el pH y el contenido de materia orgánica influyen en la movilidad y disponibilidad de los elementos en el continuo suelo-planta y, por ello, su interacción es esencial para evitar la degradación del recurso. Según Olivares et al. (2022), este tipo de propiedades del suelo, en conjunto con las propiedades morfológicas de campo, proporcionan una herramienta valiosa para estudiar una variedad de características del suelo, incluidas las relacionadas con el desarrollo del suelo en áreas agrícolas, debido a la facilidad y rapidez con que se pueden describir.

En la profundidad 1, el N mostró asociación positiva ($p < 0,01$) con Cox, MO, Na, S y NH_4^+ , revelando que las concentraciones de N en el suelo tienen un impacto positivo en

las concentraciones de los otros elementos nutrientes (Hamnér et al., 2017) y negativo con pH y contenidos de Fe, los cuales fueron particularmente altos en algunos sitios muestreados, que muestran reacción ácida con deficiencia de nutrientes como Ca, P, Mg y K. En la profundidad 2 (10 - 20 cm), la materia orgánica mostró correlación positiva ($p < 0,01$) con los contenidos de Coxid, Na, S, Ntotal y NH_3^- , además de Mg, Fe, Cu, Zn y B; resaltando su papel como fuente y almacén de estos elementos, como lo evidencia Ondrasek et al. (2019).

Adicional a lo enunciado, el N mostró asociación positiva con los contenidos de P y Mg, lo que permite verificar que contenidos altos de N en el suelo no reducen otros de vital importancia para las plantas (Hamnér et al., 2017); a su vez, se relacionó de forma negativa con Na, lo que concuerda con Murtaza et al. (2017) quienes afirman que su presencia, en forma intercambiable, puede limitar la producción agrícola; entre otras causas, por el daño físico a los suelos que generan condiciones reductoras y, con ello, favorecen los procesos de desnitrificación con pérdida de N a la atmósfera.

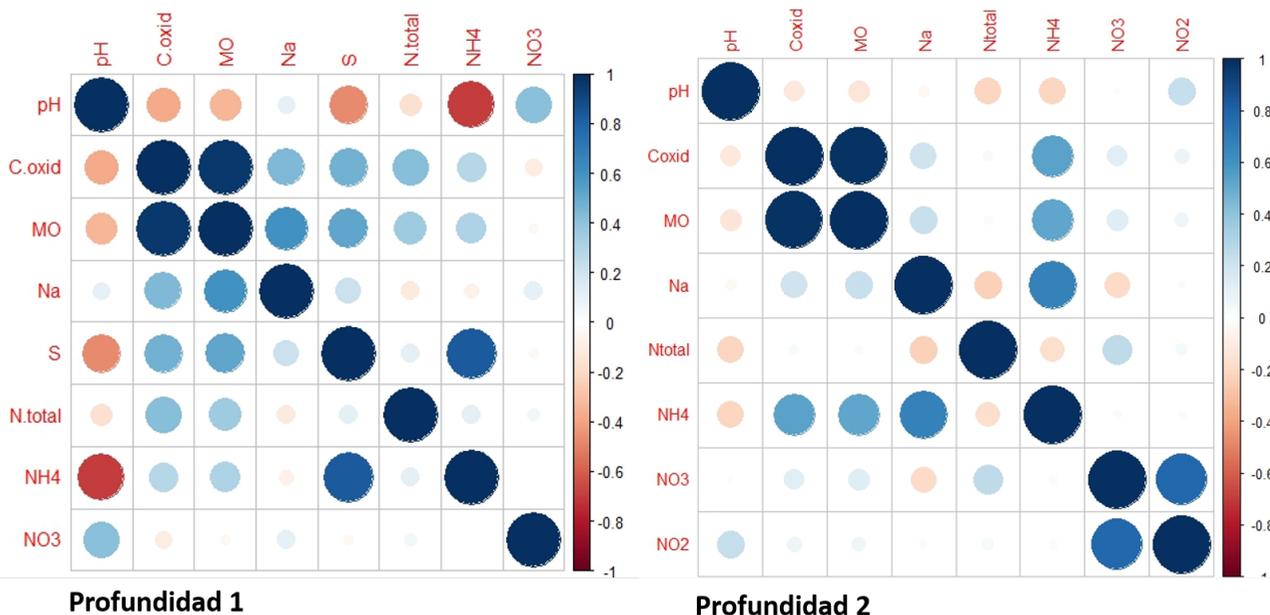


Figura 5. Análisis de correlación de Pearson de elementos y contenidos de C, N y MO en Zona Bananera. Se muestran aquellas variables que resultaron con alto nivel de significancia ($p < 0,01$). **Fuente:** autores



En resumen, para la búsqueda de mejoras en la productividad del banano y los demás cultivos en regiones tropicales, y la selección de áreas realmente aptas para el óptimo desarrollo de estos, es fundamental realizar estudios que contemplen la caracterización del suelo, como el realizado en esta investigación, en cuanto a propiedades o atributos importantes dentro del agroecosistema. Tal como lo reportan los avances de Olivares (2016), mediante el establecimiento de modelos de propiedades de suelo que repercuten en la productividad de los cultivos (Olivares, Araya-Alman et al., 2020; 2022) y en su relación con las características económicas, sociales y la sostenibilidad de esas zonas (Olivares, Pitti et al., 2020; Olivares & Hernández, 2019).

Priorización de alternativas. A partir de la valoración de los expertos y de los referentes teóricos, se seleccionaron aquellas variables que ejercen mayor grado de influencia sobre el problema e inciden en la zona de estudio, priorizando las siguientes: prácticas agrícolas, condiciones climáticas y características edáficas. Así mismo, el manejo de N debe ser cuidadoso, al ser este el nutriente principal que entra a la cadena trófica por distintas vías; ya que pasa al suelo en forma de amonio y óxidos, puede ser fijado biológicamente por simbiosis, ser incorporado por las plantas y, una vez mueren estas, dar continuidad al ciclo de materia orgánica; siendo, por esto, fundamental en la sostenibilidad del sistema.

El suelo tiene capacidad de proteger la materia orgánica de la degradación, a través de sus partículas minerales, sin embargo, esa capacidad de amortiguación es limitada. Las tasas de mineralización del carbono (C) y del nitrógeno (N) en el suelo dependen de varios factores: uno de ellos es la concentración de C, primordial en la relación C/N que marca la dinámica de la materia orgánica (mineralización e inmovilización) mediante mecanismos que se dan simultáneamente en el suelo. Al respecto, Matus y Maire (2000) concluyeron que la mineralización del suelo depende del grado de saturación y el contenido de MOS, más que de la textura de éste; y Fernández et al. (2007) y Ojeda et al. (2015) estiman que la formación de sustancias húmicas en suelos modificados con lodos, utilizados como enmienda orgánica para la

restauración, puede explicar las reservas de carbono orgánico que contribuyeron al secuestro efectivo de carbono en los incrementos del COS, demostrando que la estabilidad de los agregados del suelo fue mayor en los suelos tratados con lodos.

Así, la presencia de residuos orgánicos carbonados de calidad y cantidad es base para la acumulación de MOS estable, y la resiliencia de los sistemas y un incremento o merma del contenido de N mineral disponible altera la relación C/N (Ondrasek et al., 2019; Hamnér et al., 2017; Murtaza et al., 2017). Considerando que el N orgánico es soluble en el agua, puede estar sujeto a lavado y lixiviación, así como el amonio y los óxidos pueden liberarse hacia la atmósfera en emisiones gaseosas. Por eso es importante minimizar pérdidas en el sistema suelo – planta y así mantener la sostenibilidad del agroecosistema, tal como lo expresan Murtaza et al. (2017).

Por lo anterior, las alternativas sugeridas buscan promover el uso racional de fertilizantes nitrogenados, teniendo en cuenta que existen formas heterogéneas de incorporar N al sistema, y también a disminuir pérdidas para no reducir los niveles de producción. Acorde con lo descrito se propuso:

- Optimizar la eficiencia de fertilizantes de acuerdo con las características edáficas (textura, erosión hídrica, infiltración del agua en el suelo, CIC, MO, pH, temperatura del suelo, entre otros) y los criterios técnicos de nutrición vegetal.
- Monitorear los niveles de N y C en los suelos de la zona de estudio, y cambios en otras variables.
- Fomentar la incorporación de N en formas diferentes, como la fijación simbiótica usando coberturas vegetales con leguminosas y el empleo de inhibidores de ureasa.
- Regular el tiempo, cantidad y calidad de agua para riego de los cultivos.
- Fomentar la incorporación de materia orgánica estabilizada (humus) que proporcione mayor resiliencia del sistema y menor impacto ambiental. 

CONCLUSIONES

Respecto de la concentración de macro y microelementos, y su relación con contenidos de C, N y MO en los suelos el municipio Zona Bananera (Magdalena), los resultados evidencian que, al compararse con los estándares de referencia, presentan contenidos medios de MO y niveles altos de nitratos, especialmente en las fincas bananeras. Lo que indica la necesidad de implementar monitoreos para la concentración de N e incorporar más prácticas para aumentar el contenido de C en el suelo, en pro de mantener su relación y la sostenibilidad en la producción agrícola. Igualmente, la incorporación de tallos y restos de cosechas al cultivo del banano son actividades agrícolas que proporcionan carbono y nitrógeno al suelo, indispensables para mantener el ciclo de la MO, por lo cual debe continuar y reforzarse con más adición de MO.

En síntesis, este estudio tiene relevancia agronómica (expresada en propuestas para mejorar el sistema productivo), ya que tiene el fin de garantizar la obtención de productos de calidad, enfatizando en el uso correcto de fertilizantes. Además, presenta preponderancia ambiental (contribuyendo a garantizar la producción sostenible de cultivos en la región) y social, pues permite la unión entre la academia, la investigación y la experticia de los productores para analizar y encontrar puntos de acuerdo con problemas que afectan a las comunidades y, de esta forma, tomar las mejores decisiones posibles.

Así mismo, tiene gran utilidad metodológica debido a que proporciona nuevos enfoques para estudiar el evento o

tema. Por otra parte, la conveniencia de este estudio está orientada al manejo sostenible del recurso edáfico, toda vez que se identifica la concentración de nutrientes y sus posibles relaciones. Esto es de vital importancia para su manejo eficiente y el sostenimiento de la productividad del territorio con un enfoque de diagnóstico participativo, que permita encontrar soluciones desde diferentes miradas y seleccionar las prácticas de manejo sostenible con las condiciones edafoclimáticas existentes. Por último, este estudio incrementa el conocimiento existente, se desarrolla gracias o apoya a fundamentos teóricos ya conocidos, también puede aplicarse en otras instituciones, comunidades u organizaciones agrícolas de Colombia.

Recomendaciones: De acuerdo con las conclusiones, se debe reducir la sobreestimación de N en la producción agrícola de la zona de estudio; investigar la respuesta de los cultivos a las condiciones edafoclimáticas del área; y la respuesta a fuentes, dosis, y sistema de aplicación de fertilizante, sin desvincular el cultivo del ecosistema. Las alternativas propuestas están en línea frente a las acciones de mitigación a fenómenos de cambio climático y demandan la instalación e investigación en sistemas de monitoreo y pronósticos que faciliten acceder al estudio de variables agroclimáticas; así como la adopción de tecnologías limpias y de buenas prácticas agrícolas que incorporen áreas de biodiversidad en sus unidades productivas, junto a la planificación del sistema de producción acompañada de políticas gubernamentales. 

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Sonia Esperanza Aguirre Forero: Metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original.

Nelson Virgilio Piraneque Gambasica: investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura, revisión y edición.

Rosmery Cruz O'Byrne: revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Magdalena en Santa Marta, Colombia, por la financiación del proyecto de investigación a través de la convocatoria Fonciencias - 2019.

LITERATURA CITADA

Aguirre, S. E., Piraneque, N. V. & Díaz, C. J. (2019). Valoración del Estado del Suelo en Zona de Bosque Seco Tropical Mediante



- Técnicas Analíticas y Cromatogramas. *Información tecnológica*, 30(6), 337-350. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600337>
- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V. & Ramírez, S. I. (2018). Parámetros edáficos asociados al daño por *Mycosphaerella fijiensis* Morelet en la Zona Bananera del Magdalena (Colombia). *Revista Espacios*, 39(26), 18.
- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V. & Vásquez, J. (2018). Características Edáficas y Su Relación Con Usos Del Suelo En Santa Marta, Colombia. *Entramado*, 14(1), 242-250, <https://doi.org/10.18041/Entramado.2018v14n1.27141>
- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V. & Rodríguez, J. (2015). Relationship between the nutritional status of banana plants and black sigatoka severity in the Magdalena region of Colombia. *Agronomía Colombiana*, 33(3), 348-355. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n3.51900>
- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V. y Menjivar, J. (2012). Relación entre las propiedades edafoclimáticas y la incidencia de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en la zona bananera del Magdalena-Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3, 13-25.
- Assunção, S. A., Pereira, M. G., Rosset, J. S., Berbara, R. L. L. & García, A. C. (2019). Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. *Science of the Total Environment*, 658, 901-911. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.271>
- Barati, A. A., Azadi, H., Dehghani, M., Lebailly, P. & Qafori, M. (2019). Determining Key Agricultural Strategic Factors Using AHP-MICMAC. *Sustainability*, 11(14), 3947. <https://doi.org/10.3390/su11143947>
- Barberena, I. M., Espindula, M. C., De Araújo, L. F. B. & Marcolan, A. L. (2019). Uso de inibidores de urease para reduzir a volatilização de amônia em solos amazônicos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 54, 1-9. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00253>
- Bertsch, F. (1986), *Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.
- Cerón, L. y Aristizábal, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.
- Dalal, S. G., Shirodkar, P. V., Jagtap, T. G., Naik, B. G. & Rao, G. S. (2010) Evaluation of significant sources influencing the variation of water quality of Kandla creek, Gulf of Katchchh, using PCA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163, 49-56.
- Do Nascimento, C. A. C., Pagliari, P. H., Faria, L. D. A. & Vitti, G. C. (2018). Phosphorus mobility and behavior in soils treated with calcium, ammonium, and magnesium phosphates. *Soil Science Society of America Journal*, 82(3), 622-631. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.06.0211>
- Fernández, J. M., Hernández, D., Plaza, C. & Polo, A. (2007). Organic matter in degraded agricultural soils amended with composted and thermally-dried sewage sludges. *The Science of the Total Environment*, 378, 75-80. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.008>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse*. <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>
- García, F. (2015). Criterios para el manejo de la fertilización de la soya. *Informaciones agronómicas*, 27, 1-5. <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/criterio-para-el-manejo-de-la-fertilizaci-1.pdf>
- Hamnér, K., Weih, M., Eriksson, J. & Kirchmann, H. (2017). Influence of nitrogen supply on macro-and micronutrient accumulation during growth of winter wheat. *Field crops research*, 213, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.002>
- Hasanuzzaman, M., Borhannuddin, M. H. M., Nahar, K., Hossain, M. D. S., Mahmud, J. A., Hossen, M. D. S., Chowdhury, A. A., Fujita, M. & Fujita, M. (2018). Potassium: a vital

regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8(3), 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2009). Estudio general de suelos y zonificación de tierras, Departamento del Magdalena. Imprenta Nacional de Colombia.

Kebonye, N. M., Eze, P. N., Ahado, S. K. & John, K. (2020). Structural equation modeling of the interactions between trace elements and soil organic matter in semiarid soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(4), 2205-2214. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02610-1>

Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4) 2012-222. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>

Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global, Climate Change and Food Security. *Science*, 304, 1623-1627, <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

Manabe, S. (2019). Role of greenhouse gas in climate change. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 71(1). <https://doi.org/10.1080/16000870.2019.1620078>

Matus, F. J. y Maire, C. R. (2000). Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica*, 60(2), 112-126.

Murtagh, F. & Legendre, P. (2011). Ward's hierarchical clustering method: Clustering criterion and agglomerative algorithm. *Journal of Classification*, 31, 274-295. <https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z>

Murtaza, B., Murtaza, G., Imran, M., Amjad, M., Naeem, A. & Shah, G. M. (2017). Yield and nitrogen use efficiency of rice-wheat cropping system in gypsum amended saline-sodic soil. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17(3), 686-701. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017000300011>

Ojeda, G., Ortiz, O., Medina, C. R., Perera, I. & Alcañiz, J. M. (2015). Carbon

sequestration in a limestone quarry mine soil amended with sewage sludge. *Soil Use and Management*, 31(2), 270-278. <https://doi.org/10.1111/sum.12179>

Olivares, B. (2016). Descripción del manejo de suelos en sistemas de producción agrícola del sector Hamaca de Anzoátegui, Venezuela. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 23(1), 14-24. <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.02>

Olivares, B. & Hernández, R. 2020. Application of multivariate techniques in the agricultural land's aptitude in Carabobo, Venezuela. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2),1-12

Olivares, B. & Hernández, R. (2019). Ecoterritorial sectorization for the sustainable agricultural production of potato (*Solanum tuberosum* L.) in Carabobo, Venezuela. *Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, 20(2), 339-354. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1462

Olivares, B., Araya-Alman, M., Acevedo-Opazo, C., Rey, J. C., Lobo, D., Landa, B. B. & Gómez, J. A. (2020). Relationship Between Soil Properties and Banana Productivity in the Two Main Cultivation Areas in Venezuela. *Journal of soil science and plant nutrition*, 20(3), 2512-2524. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00317-8>

Olivares, B. y Hernández, R. (2019). Análisis regional de zonas homogéneas de precipitación en Carabobo, Venezuela. *Revista Lasallista de Investigación*, 16(2), 90-105. <https://doi.org/10.22507/rli.v16n2a9>

Olivares, B., Lobo, D., Cortez, A., Rodríguez, M. F. & Rey, J. C. (2017). Socio-economic characteristics and methods of agricultural production of indigenous community Kashaama, Anzoátegui, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, 34 (2),187-215. <https://n9.cl/p2gc5>

Olivares, B., Paredes, F., Rey, J., Lobo, D. & Galvis-Causil, S. (2021). The relationship between the normalized difference



vegetation index, rainfall, and potential evapotranspiration in a banana plantation of Venezuela. *SAINS TANAH - Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 18(1), 58-64. <http://dx.doi.org/10.20961/stjssa.v18i1.50379>

Olivares, B., Pitti, J. & Montenegro, E. (2020). Socioeconomic characterization of Bocas del Toro in Panama: an application of multivariate techniques. *Revista Brasileira de Gestao e Desenvolvimento Regional*, 16(3), 59-71. <https://n9.cl/cugz>

Olivares, B. & Zingaretti, M. L. (2019). Aplicación de métodos multivariados para la caracterización de periodos de sequía meteorológica en Venezuela. *Revista Luna Azul*. 48(1),172:192. <http://dx.doi.org/10.17151/luaz.2019.48.10>

Olivares, B. O., Calero, J., Rey, J. C., Lobo, D., Landa, B. B. & Gómez, J. A. (2022). Correlation of banana productivity levels and soil morphological properties using regularized optimal scaling regression. *Catena*, 208 (1), 105718. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105718>

Ondrasek, G., Begić, H. B., Zovko, M., Filipović, L., Meriño-Gergichevich, C., Savić, R. & Rengel, Z. (2019). Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. *Science of The Total Environment*, 658, 1559-1573. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.243>

R CORE TEAM. 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Viena: R Foundation for Statistical Computing.

Tabachnick, B. G. & Fidell, L. S. (2007). *Using multivariate statistics* (7th ed). Pearson. <https://www.pearsonhighered.com/assets/preface/0/1/3/4/0134790545.pdf>.

Vázquez, M. (2005). *Micronutrientes en la Agricultura*. Asociación Argentina de las Ciencias del Suelo.

Vásquez, J. R., Macías, F. y Menjivar, J. C. (2013). Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el departamento del Magdalena, Colombia. *Bioagro*, 25(3), 175-180.

Wiatrowska, K. & Komisarek, J. (2019). Role of the light fraction of soil organic matter in trace elements binding. *Plos one*, 14(5), e0217077. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217077>

Wang, Y. & Wu, W. H. (2017). Regulation of potassium transport and signaling in plants. *Current opinion in plant biology*, 39, 123-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.06.006>

Zapata, R. D. y Osorio, W. (2010). La materia orgánica del suelo. En H. Burbano y F. Silva. (Eds.), *Ciencia del suelo: principios básicos* (pp. 357-396). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



