

## CALIDAD DEL SUELO EN ZONAS PRODUCTORAS DE MANGO EN EL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA, COLOMBIA

Marlon J. Yacomelo-Hernández<sup>1</sup>, Gustavo Rodriguez-Yzquierdo<sup>2</sup>, Rommel I. Leon-Pacheco<sup>1</sup>, Miguel A. Lobato-Ureche<sup>1</sup>, Elías D. Flórez-Cordero<sup>1</sup> y Francisco F. Carrascal-Pérez<sup>1</sup>

### RESUMEN

El mango de azúcar (*Mangifera indica* L.) es cultivado en el departamento del Magdalena, municipios de Santa Marta y Ciénaga principalmente, lugar donde expresa su mejor comportamiento agronómico y mejor calidad de la fruta. Su alta demanda ha generado la necesidad de aumentar las áreas del cultivo; sin embargo, no existen criterios definidos para identificar zonas potenciales para su establecimiento. El estudio consistió en construir un índice de calidad de suelo para la producción de mango en función de doce indicadores físicos y quince indicadores químicos de los suelos. En siete fincas de mango de azúcar del departamento del Magdalena se seleccionaron tres parcelas de 350 m<sup>2</sup> por finca y en cada parcela se caracterizaron las propiedades físicas y químicas de los suelos. Las características de los suelos donde el cultivar expresa su mayor rendimiento y calidad de fruta fueron los indicadores de referencia para cada variable estudiada. El indicador de calidad de suelo se formuló en función de las variables que explicaban mayor variabilidad y fueron más redundantes en base a sus correlaciones. Adicionalmente, se dio un peso a cada variable dependiendo de su importancia para el comportamiento agronómico del cultivar. Los indicadores del suelo mostraron variación, especialmente los nutrientes Zn, Cu, Fe, S y P en las propiedades químicas y la infiltración y el índice de estructura en las propiedades físicas. Las variables químicas y físicas con mayor peso fueron el pH y el contenido de arena, respectivamente. El índice de calidad de suelo propuesto resultó ser un buen método para clasificar la calidad del suelo para la producción de mango de azúcar en función de indicadores físicos y químicos del suelo.

**Palabras clave adicionales:** Fertilidad del suelo, indicadores, productividad, propiedades del suelo

### ABSTRACT

#### Soil quality in mango producing areas in Magdalena State, Colombia

Sugar mango (*Mangifera indica* L.) is cultivated in the department of Magdalena, municipalities of Santa Marta and Ciénaga mainly, where it expresses its best agronomic behavior and best fruit quality. Its high demand has generated the need to increase the cultivation areas; however, there are no defined criteria to identify potential areas for its establishment. The study consisted of constructing a soil quality index for sugar mango production, based on twelve physical and fifteen chemical indicators of the soil. In seven sugar mango farms in the department of Magdalena, three plots per farm of 350 m<sup>2</sup> were selected and the properties of the soils were characterized in each plot. The characteristics of the soil where the cultivar expresses its highest yield and fruit quality were the reference indicators. The soil quality indicator was formulated based on the variables that explained greater variability and were more redundant based on their correlations. Additionally, a weight was given to each variable depending on its importance for agronomic behavior of the cultivar. The soil indicators showed variation, especially the nutrients Zn, Cu, Fe, S, and P in the chemical properties and infiltration and structure index in the physical properties. The chemical and physical variables with the greatest weight were pH and sand content, respectively. The proposed soil quality index turned out to be a good method to classify soil quality for sugar mango production based on physical and chemical soil indicators.

**Additional keywords:** Indicators, productivity, soil fertility, soil properties

### INTRODUCCIÓN

El mango de azúcar (*Mangifera indica* L.) ocupa un puesto privilegiado en la fruticultura colombiana; debido a su delicada fragancia, color atractivo y delicioso sabor, se consume como fruta de mesa y en diferentes preparaciones culinarias. Es una de las frutas tropicales más importantes del mundo en términos de producción, superficie cultivada, y popularidad, con una producción

global que excede los 60 millones de toneladas (FAOSTAT, 2021). En Colombia para el año 2021 se reportaron más de 30 mil hectáreas y una producción mayor a las 300 mil toneladas, de las cuales el mango de azúcar aportó 59.842 toneladas, siendo además el que mayor representación tuvo en el mercado de exportación (Agronet, 2022).

En Colombia, el cultivo expresa un alto

Recibido: Octubre 11, 2022

Aceptado: Abril 4, 2023

<sup>1</sup>Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Centro de Investigación Caribia, Santa Marta, Magdalena, Colombia. e-mail: [myacomelo@agrosavia.co](mailto:myacomelo@agrosavia.co) (autor de correspondencia); [rpacheco@agrosavia.co](mailto:rpacheco@agrosavia.co); [mlobato@agrosavia.co](mailto:mlobato@agrosavia.co); [edflores@agrosavia.co](mailto:edflores@agrosavia.co); [fcarrascal@agrosavia.co](mailto:fcarrascal@agrosavia.co)

<sup>2</sup>Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Sede Central, Bogotá, Colombia. e-mail: [grodriquezy@agrosavia.co](mailto:grodriquezy@agrosavia.co)

potencial productivo y mayor calidad organoléptica cuando se cultiva en la región Caribe colombiana, en particular en el departamento del Magdalena, en los municipios de Santa Marta y Ciénaga (Yacomelo et al., 2021). Esta parece ser la zona agroecológica de preferencia para el desarrollo de este material, debido a su particular oferta climática y edafológica; sin embargo, el espacio disponible para el establecimiento de nuevas áreas es limitada, lo que impide el aumento de la producción y el crecimiento del área cultivada. Por consiguiente, las políticas actuales en materia de investigación a nivel frutícola se enfocan en determinar la calidad de los suelos en la región a fin de definir áreas potenciales para la producción frutícola (Arcila et al., 2022).

El concepto de calidad del suelo incluye la evaluación de las propiedades y procesos en relación con la capacidad de éste para funcionar eficazmente como componente de un ecosistema saludable (Bünemann et al., 2018). Este componente juega un papel importante en el mantenimiento de los servicios de los ecosistemas naturales y la salud de la sociedad humana (Li. et al., 2021; Cetin y Jawed, 2022). La calidad del suelo se centra en su estado interno y estático en una escala a largo plazo (Yin et al., 2022) y se evalúa principalmente a partir de las funciones de los servicios ecosistémicos como son la producción biológica, conservación del suelo, purificación ambiental, conservación de la biodiversidad, conservación del agua, regulación del clima, ciclo de nutrientes y carbono, y herencia cultural (Lal, 2016).

En Colombia se han desarrollado diversas iniciativas para definir indicadores de calidad del suelo, como el desarrollo de un sistema georreferenciado que caracteriza elementos morfológicos y analíticos del suelo (Rubiano y Beaulieu, 2005). Sin embargo, índices de calidad de suelo para la producción de mango de azúcar no existen, generando incertidumbre en los productores a la hora de seleccionar los suelos para establecer un cultivo.

En la última década, diversos autores han escrito sobre las formas de medición y utilización de indicadores de calidad del suelo (Raiesi y Kabiri, 2016). Recientemente, se ha incorporado el uso de indicadores de calidad del suelo que permiten integrar los componentes químicos y

físicos, junto a los procesos biológicos del suelo de un agroecosistema (Acevedo et al., 2021). Sin embargo, no existe un método estándar establecido a nivel mundial para la elaboración de los índices de calidad. Aunque es importante destacar que la construcción de un índice de calidad del suelo con alta aplicabilidad debe estar basado en las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo y debe ir acompañado de parámetros relacionados con el rendimiento del cultivo (Yu et al., 2018).

En este contexto, derivado del interés de la cadena productiva de mango en el departamento del Magdalena y con el fin de conservar la fertilidad y la productividad de los suelos en este sistema productivo, se realizó el presente estudio, con el objetivo de construir un índice de calidad de suelo para la producción de mango de azúcar en función de doce indicadores físicos y quince indicadores químicos de los suelos de las fincas productoras, en el departamento del Magdalena.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización.** El estudio se realizó en fincas productoras de mango de azúcar en el departamento de Magdalena, en los municipios de Santa Marta y Ciénaga ubicados geográficamente al norte de la República de Colombia entre las latitudes 11°00' y 11°15' N y las longitudes 74°12' y 74°15' W. En cada finca se caracterizó el manejo agronómico del cultivo y se definieron los rangos óptimos de su productividad en la región. El clima de la zona se define como cálido seco según clasificación propuesta por Köppen. Los suelos de las zonas productoras seleccionadas son del orden Entisol. Estos suelos se caracterizan por tener horizontes pedogenéticos poco desarrollados, un pH entre 5 y 6,5, moderado contenido de Ca y Mg, bajo contenido de materia orgánica, textura franco-arenosa con buen drenaje y profundidad efectiva menor de 100 cm (Arcila et al., 2022), con concentraciones en el rango de suficientes a alta de P, Ca, Mg, K, Fe, Cu y Zn; y en rango de baja a muy baja de S, Na, Mn y B de acuerdo con los estándares propuestos por Osorio (2014).

**Formulación del índice de calidad de suelo.** Durante el 2019 se seleccionó una muestra representativa del 5 % de la población correspondiente a siete fincas con implementación

de buenas prácticas agrícolas (BPA) y certificación Global Gap. En las fincas seleccionadas se realizó un muestreo de suelo en tres parcelas de 350 m<sup>2</sup> establecidas a una distancia de siembra de 10 x 10 m y en cada parcela se seleccionaron un total de diez árboles, cinco de mayor productividad con rendimientos superiores a 250 kg·año<sup>-1</sup> por árbol y cinco con rendimientos menores a esa cifra.

Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones que correspondieron a las parcelas.

**Análisis químico.** En cada una de las parcelas se tomaron muestras de suelo por cada árbol a 25 cm de profundidad. Cada muestra de suelo estuvo compuesta por la mezcla de diez submuestras tomadas alrededor de la zona de gotera del árbol. Las propiedades químicas del suelo analizadas fueron materia orgánica (MO), pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de nitratos y concentración de nutrientes (N, P, K, S, Ca, Mg, Na, B, Zn, Cu, Fe, Mn). Los métodos empleados para la determinar la concentración de nutrientes en el suelo fueron pH y CE (1:5): Norma Técnica Colombiana (NTC); MO: Walkley-Black; fósforo: Bray II; azufre y boro: fosfato monobásico de calcio; acidez (Al+H) y aluminio intercambiable: KCl; y calcio, magnesio, potasio y sodio por espectrofotometría de absorción atómica.

**Variables físicas.** Las propiedades físicas determinadas fueron profundidad efectiva, densidad aparente (método del cilindro), evaluada a profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm, infiltración (anillo de infiltración), estabilidad estructural del suelo (índice de estructura-IE y diámetro ponderado medio-DPM, método de Yoder) (Jaramillo, 2011), distribución de tamaño de partículas (método del hidrómetro o de Bouyoucos) y resistencia a la penetración (penetrómetro manual) (USDA, 1999).

Los atributos físicos y químicos cuantificados en las parcelas donde mejor productividad presentó el cultivo fueron los indicadores de referencia para cada variable estudiada. Se realizó un análisis de componentes principales (CP), se seleccionaron aquellos que tuvieron valores propios (VP) mayores a uno y en cada componente se extrajeron las propiedades que presentaron un peso mayor o igual al 10 % del VP

del respectivo componente (Andrews y Carroll, 2001). Se realizó un análisis de correlación lineal (ACL) entre las variables seleccionadas inicialmente y se consideraron redundantes aquellas que presentaron un coeficiente de correlación mayor a 0,7 (Andrews y Carroll, 2001). Se realizó un nuevo ACL entre las propiedades redundantes para seleccionar las que tuvieran mejor correlación, se hizo la sumatoria de los valores absolutos del coeficiente de correlación de cada propiedad y se eliminó la propiedad de cada pareja que presentó la menor sumatoria. Todas las variables que no fueron redundantes ( $r^2 < 0,7$ ) se incluyeron entre las variables a tener en cuenta para generar el indicador de calidad de suelo.

Se estandarizaron los indicadores de referencia con el fin de normalizarlos. Para ello se aplicó la siguiente ecuación de la variable estandarizada (Andrews y Carrol, 2001):

$$\text{Variable estandarizada (n)} = \frac{|n - X|}{DE}$$

Donde  $n$  corresponde al indicador evaluado.

X: media de los indicadores de referencia.

DE: desviación estándar de la muestra.

Una vez estandarizados los indicadores, la media de los indicadores de referencia (X) se considera el valor óptimo de referencia (VOR), en el cual el cultivar expresa su mejor comportamiento agronómico. Para analizar los indicadores estandarizados de referencia, se tuvo en cuenta que el valor ideal del VOR es cero.

Con el fin de dar peso a las condiciones ideales, el siguiente paso consistió en categorizar los resultados de los indicadores de referencia estandarizados con base en el Cuadro 1. Si el resultado de la estandarización se encontraba entre 0 y 1, el valor categórico sería 1; por lo tanto, en la medida que el valor se alejó de la escala óptima, su calificación fue menor en la categorización.

Adicionalmente a la categorización, en la formulación del índice de calidad se dio un peso adicional a cada variable con base en su contribución e importancia para el comportamiento agronómico del cultivar (Glover et al., 2000). Para el índice propuesto la variable química de mayor peso fue el pH y para la variable física el contenido de arena. De esta manera, el índice de calidad de suelo (ICAS) se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$(ICAS) = \frac{I_{pf} + I_{pq}}{2}$$

Donde:

$$I_{pf} = \frac{IA \times 10 + IE + I_{inf} + IDPM + \dots + I_n}{n}$$

$$I_{pq} = \frac{I_{pH} \times 50 + ICE \times 5 + IMO \times 5 + \dots + I_n}{n}$$

$I_{pf}$ : índice de propiedades físicas

$I_{pq}$ : índice de propiedades químicas

Los términos de estas ecuaciones fueron calculados a partir de la ecuación de la variable estandarizada.

IA: índice de arena. Inf: infiltración.

IE: índice estabilidad estructural.

IDPM: índice diámetro ponderado medio.

$I_{pH}$ : índice pH.

ICE: índice conductividad eléctrica.

IMO: índice materia orgánica.

$I_n$ =otros índices seleccionados para el modelo.

**Cuadro 1.** Categorización de los indicadores de referencia estandarizados propuesta por los autores para el cultivo de mango de azúcar (*Mangifera indica* L.) en el departamento del Magdalena, Colombia

Escala valores de referencia	Calificación
0 – 1,0	1
1,1 - 2,00	0,80
2,01 – 3,00	0,40
3,01 – 4,00	0,20
>4,01	0,10

Los resultados se interpretaron con base en la categorización propuesta en el Cuadro 2, donde la mayor calidad del suelo para la producción de mango de azúcar es aquella con valores del ICAS mayores a 8,0.

**Análisis estadístico.** Los datos obtenidos de la caracterización de suelo fueron analizados con el programa estadístico SAS v. 5.1 (Cary, NC, USA). Se realizó un análisis descriptivo (media, desviación estándar, error estándar, coeficiente de variación, valor mínimo y máximo) para conocer la variabilidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas a nivel de los suelos de las fincas muestreadas; seguidamente, un análisis de correlación para determinar la relación entre las propiedades evaluadas y la productividad, un análisis de componentes principales (ACP) con el fin de extraer las propiedades que presentaron un

peso mayor o igual al 10 % del VP del respectivo componente (Andrews y Carroll, 2001).

**Cuadro 2.** Clasificación del suelo propuesta por los autores en función Índice de calidad de suelo (ICAS) para la producción de mango de azúcar (*Mangifera indica* L.), en el departamento del Magdalena, Colombia

Calidad de suelo	Clasificación
Alta calidad de suelo	>8,00
Adecuada calidad de suelo	6,30 – 8,00
Moderada calidad de suelo	4,80 – 6,29
Baja calidad de suelo	<4,80

## RESULTADOS

Se encontró mayor variación en las propiedades químicas que en las físicas. Las concentraciones de los nutrientes variaron entre fincas, siendo los nutrientes Zn, Cu, Fe, S y P los que presentaron mayores coeficientes de variación (>80 %). Las propiedades químicas que presentaron menores coeficientes de variación fueron el pH, Ca, MO y CIC. De las propiedades físicas, las que mayor variación presentaron fueron infiltración (I) e índice de estructura (IE). Entre los nutrientes, cuyas concentraciones presentaron alta dispersión con respecto a sus medias muestrales estuvieron el P y Fe, con concentraciones mínimas/máximas de 4,56/198,51 mg·kg<sup>-1</sup> para P y de 5,00/123,98 mg·kg<sup>-1</sup> para Fe (Cuadro 3). La dispersión de estos nutrientes se debe, posiblemente, al retorno de P y Fe en los residuos de cultivos o a la aplicación de insumos agrícolas, que mejoran la fertilidad del suelo. Estas actividades están alineadas con el manejo del productor en las fincas, que consiste en la implementación de podas de formación y despunte luego de la cosecha, seguido de fertilización edáfica en función de requerimientos del cultivo. Así mismo, en función de la localidad se implementan procesos de inducción floral con nitratos de potasio y/o nitrato de calcio, y una vez que inicia la floración y cuajado del fruto se finaliza con la implementación de riegos y una fertilización final para ayudar en los procesos de llenado de la fruta y de esta manera garantizar alta calidad en la fruta.

**Cuadro 3.** Caracterización física y química de los suelos en siete fincas productoras de mango de azúcar (*Mangifera indica* L.) en el departamento del Magdalena, Colombia

Indicador	Media	DE	Min	Max	CV
pH	7,19	0,61	6,17	8,38	8,49
Conductividad Eléctrica (CE) (dS·m <sup>-1</sup> )	0,39	0,27	0,13	1,27	70,74
Materia Orgánica (MO) (%)	1,06	0,35	0,42	1,86	32,57
Fosforo (mg·kg <sup>-1</sup> )	47,20	47,58	4,56	198,51	100,80
Azufre (mg·kg <sup>-1</sup> )	4,68	4,89	1,67	25,88	104,33
CIC (cmol·kg <sup>-1</sup> )	12,77	4,14	7,36	25,00	32,43
Boro (mg·kg <sup>-1</sup> )	0,38	0,35	0,02	1,03	90,25
Calcio (cmol(+)/kg)	9,55	2,96	4,78	17,84	30,98
Magnesio (cmol(+)/kg)	2,38	1,09	1,21	5,63	45,68
Potasio (cmol(+)/kg)	0,46	0,34	0,10	1,11	73,35
Sodio (cmol(+)/kg)	0,39	0,39	0,14	1,89	99,88
Hierro (mg·kg <sup>-1</sup> )	26,33	30,21	5,00	123,98	114,75
Cobre (mg·kg <sup>-1</sup> )	2,52	5,93	1,00	30,18	235,65
Manganeso (mg·kg <sup>-1</sup> )	1,42	0,55	1,00	3,03	38,49
Zinc (mg·kg <sup>-1</sup> )	3,36	8,07	1,00	40,24	239,85
Densidad aparente 10cm (Da1) (g·cm <sup>-3</sup> )	1,57	0,10	1,36	1,84	6,65
Densidad aparente 20cm (Da2) (g·cm <sup>-3</sup> )	1,66	0,06	1,57	1,80	3,63
Densidad aparente 30cm (Da3) (g·cm <sup>-3</sup> )	1,75	0,09	1,61	1,93	5,33
Densidad aparente 40cm (Da4) (g·cm <sup>-3</sup> )	1,75	0,11	1,52	1,98	6,51
Densidad aparente 50cm (Da5) (g·cm <sup>-3</sup> )	1,82	0,08	1,68	2,03	4,65
Infiltración (I) (mm·h <sup>-1</sup> )	8,73	5,54	1,91	20,73	63,48
Profundidad efectiva (PE) (cm)	73,36	17,18	43,00	100,00	23,42
Arena (A) (%)	30,58	5,25	25,96	48,68	17,16
Arcilla (Ar) (%)	16,65	3,38	11,24	25,04	20,31
Limo (L) (%)	52,77	8,29	26,28	62,80	15,71
Índice de estructura (IE) (%)	105,32	44,79	59,53	216,62	42,53
Diámetro ponderado medio (DPM) (mm)	1,57	0,30	1,08	2,11	18,99

DE: desviación estándar, Max: valor máximo, Min: valor mínimo, C.V: coeficiente de variación,

**Análisis de componentes principales.** De este análisis los nueve primeros CP presentaron VP mayores de 1 y explicaron el 88 % de la varianza acumulada (Cuadro 4). En el Cuadro 5 se resaltan en letras negrillas las propiedades que, dentro de cada CP, presentaron un peso equivalente o mayor al 10 % del valor propio del componente.

En el Cuadro 6 se presentan los coeficientes de correlación lineal entre las propiedades extraídas con el ACP, observando redundancia ( $r^2 > 0,7$ ) de CE con S y B, P con K, CIC con Ca y Mg, B con K, Fe con Mn, Cu con Zn, y arena con limo y arcilla. Después de comparar los respectivos coeficientes de correlación total de las variables redundantes se eliminaron S, CE, P, Ca, Mg, Mn, Cu, A y L. El indicador de suelo se formuló a partir de las variables que más aportaron a la variabilidad explicada, es decir, la productividad, pH, MO, CIC, B, K, Na, Fe, Zn, Da1, Da2, Da3, Da4, Da5, I, PE, Ar, IE y DPM.

Para la interpretación de la información se

usaron los resultados por finca y se encontraron los valores promedios señalados en el Cuadro 7. Se observó que en todas las fincas los valores de cada indicador se encontraron por debajo de 2, lo que indica que de acuerdo con el Cuadro 1 la categorización que corresponde para todos los indicadores está entre 1 y 0,80, es decir, cercano al valor VOR, a excepción de la finca “Normandía” cuyos indicadores estandarizados fueron mayores a 2 para todas las características, por lo cual la categorización varía de 1 a 0,20.

Basado en la categorización para cada indicador se puede observar que todas las fincas seleccionadas para el muestreo tuvieron alta calidad del suelo para la producción de mango de azúcar, a excepción de la mencionada finca “Normandía”, caracterizada en el municipio de San Fernando en el departamento de Bolívar que presenta moderada calidad del suelo debido algunas limitantes en sus propiedades físicas y químicas (Cuadro 8).

**Cuadro 4.** Valores propios del análisis de componentes principales del conjunto mínimo de datos, para la selección de los indicadores de calidad del suelo en fincas cultivadas con mango de azúcar (*Mangifera indica* L) en el departamento de Magdalena, Colombia

CP	Autovalor	Diferencia	Proporción	Acumulado
1	7,88	2,81	0,26	0,26
2	5,07	1,80	0,16	0,43
3	3,27	0,75	0,1	0,54
4	2,52	0,44	0,08	0,62
5	2,07	0,19	0,06	0,69
6	1,87	0,16	0,06	0,75
7	1,71	0,58	0,05	0,81
8	1,12	0,01	0,03	0,85
9	1,11		0,03	0,88

**Cuadro 5.** Selección de indicadores (**resaltados con letras negrillas**) que presentan peso equivalente mayor al 10 % del valor propio del componente principal para 28 indicadores físicos y químicos de suelos cultivados con mango de azúcar (*Mangifera indica* L.) en el departamento del Magdalena, Colombia

Indicador	CPI	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
Productividad	-0,08	-0,21	0,00	<b>0,31</b>	0,19	0,12	0,03	<b>-0,44</b>	0,06
pH	0,21	0,27	-0,11	-0,06	-0,1	0,15	-0,12	-0,07	<b>-0,15</b>
CE	0,21	0,21	-0,12	0,07	<b>0,35</b>	-0,01	-0,1	-0,08	-0,04
MO	0,18	-0,19	0,09	0,19	<b>0,28</b>	0	-0,14	0,05	<b>-0,21</b>
P	0,24	0,11	0,16	0,16	0,06	-0,15	-0,13	<b>0,12</b>	0,04
S	0,24	0,08	0,02	0,11	<b>0,28</b>	<b>-0,18</b>	0,02	-0,1	-0,04
CIC	0,3	-0,1	-0,08	0,15	-0,14	0,04	<b>0,17</b>	0,00	0,03
B	0,28	0,15	-0,04	0,05	0,00	-0,06	-0,25	<b>0,11</b>	<b>0,13</b>
Ca	0,27	-0,15	-0,03	0,14	<b>-0,21</b>	0,03	<b>0,17</b>	0,00	0
Mg	0,28	-0,07	-0,13	0,21	-0,01	0,08	<b>0,19</b>	-0,05	<b>0,12</b>
K	0,29	0,08	0,03	0,04	-0,09	-0,16	-0,16	<b>0,18</b>	<b>0,14</b>
Na	0,06	0,26	-0,27	-0,07	<b>0,25</b>	0,14	0,15	0,01	<b>-0,2</b>
Fe	-0,15	-0,25	0,02	0,09	<b>0,32</b>	-0,12	-0,02	<b>0,33</b>	<b>-0,18</b>
Cu	0	0,12	<b>0,39</b>	-0,05	0,06	<b>0,33</b>	<b>0,22</b>	<b>0,23</b>	<b>0,11</b>
Mn	-0,13	-0,17	-0,03	0,02	<b>0,2</b>	<b>-0,32</b>	<b>0,28</b>	<b>0,32</b>	<b>-0,21</b>
Zn	0	0,13	<b>0,38</b>	-0,04	0,06	<b>0,33</b>	<b>0,19</b>	<b>0,24</b>	<b>0,14</b>
Da-10cm	-0,19	0,18	-0,01	0,21	-0,02	0,01	-0,02	<b>-0,22</b>	0,09
Da-20cm	-0,04	0,27	0,04	<b>0,27</b>	0,03	<b>0,26</b>	0,05	<b>0,19</b>	<b>-0,26</b>
Da-30cm	-0,13	0,13	-0,23	<b>0,26</b>	<b>0,21</b>	<b>0,34</b>	-0,11	0,08	0,06
Da-40cm	-0,13	-0,05	-0,08	0,24	0,07	-0,09	-0,03	<b>0,27</b>	<b>0,66</b>
Da-50cm	-0,09	0,04	-0,21	<b>0,41</b>	<b>-0,2</b>	-0,02	<b>0,3</b>	0,02	0,1
I	0,14	0,03	0,21	0,17	<b>-0,34</b>	-0,15	<b>0,26</b>	0,01	<b>-0,27</b>
PE	0,2	-0,05	0,23	-0,05	0,14	-0,15	-0,14	-0,03	<b>0,17</b>
A	0,15	-0,29	-0,06	-0,14	-0,01	<b>0,34</b>	-0,12	-0,03	0,05
Ar	0,13	-0,36	-0,08	0,00	-0,01	<b>0,18</b>	0,01	<b>0,15</b>	-0,05
L	-0,15	0,33	0,07	0,09	0,01	<b>-0,29</b>	0,07	-0,04	-0,01
IE	-0,17	-0,18	0,15	0,24	0	0,02	<b>-0,19</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,19</b>
DPM	0,13	0	<b>-0,38</b>	-0,11	0,1	-0,01	<b>0,31</b>	<b>0,15</b>	-0,04

CP: componente principal, C.E: Conductividad Eléctrica, MO: Materia Orgánica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, Da: densidad aparente, I: infiltración, A: arena, Ar: arcilla, L: limo, IE: índice de estructura, DPM: diámetro ponderado medio.

Entre las limitaciones físicas y químicas del suelo identificadas en esta finca, se pueden mencionar la alta densidad aparente del suelo, baja profundidad efectiva, bajo contenido de arena, y

estructura no ideal para el desarrollo radicular, además del bajo pH y poca disponibilidad de fósforo (Figura 1).

**Cuadro 6.** Análisis de correlación de Pearson de las variables físicas y químicas del suelo redundantes, en siete fincas productoras de mango de azúcar (*Mangifera indica* L.) en el departamento del Magdalena, Colombia

	CE	P	S	CIC	B	Ca	Mg	K	Fe	Cu	Mn	Zn	A	L	Ar
CE	1,00	0,53	0,75**	0,33	0,72**	0,16	0,43	0,50	0,31	0,05	0,28	0,02	0,06	0,12	0,19
P		1,00	0,61	0,46	0,68	0,37	0,47	0,73**	0,27	0,13	0,30	0,14	0,02	0,02	0,02
S			1,00	0,42	0,58	0,31	0,49	0,56	0,22	0,00	0,19	0,03	0,02	0,00	0,05
CIC				1,00	0,58	0,97**	0,94**	0,62	0,29	0,11	0,20	0,11	0,46	0,51	0,53
B					1,00	0,48	0,55	0,90**	0,49	0,06	0,47	0,02	0,10	0,06	0,02
Ca						1,00	0,86**	0,55	0,22	0,10	0,15	0,10	0,49	0,55	0,59
Mg							1,00	0,53	0,26	0,13	0,18	0,13	0,43	0,47	0,48
K								1,00	0,42	0,03	0,37	0,01	0,11	0,12	0,12
Fe									1,00	0,11	0,75**	0,11	0,03	0,15	0,31
Cu										1,00	0,17	0,99**	0,09	0,14	0,20
Mn											1,00	0,18	0,16	0,05	0,12
Zn												1,00	0,11	0,17	0,23
A													1,00	0,98**	0,84**
L														1,00	0,94**
Ar															1,00

(\*\*) Altamente significativos al 1 %; C.E: Conductividad Eléctrica, P: Fósforo, S: Azufre, CIC: capacidad de intercambio catiónico, B: Boro, Ca: Calcio, Mg: Magnesio, K: Potasio, Fe: Hierro, Cu: Cobre, Mn: Manganeseo, Zn: zinc, A: arena, L: limo, Ar: arcilla

**Cuadro 7.** Indicadores estandarizados de las características físicas y químicas del suelo en siete fincas productoras de mango de azúcar (*Mangifera indica* L.) en el departamento del Magdalena, Colombia

Finca	pH	MO	CIC	B	K	Na	Fe
Madona	1,01	1,07	0,28	0,91	0,87	0,62	0,68
Sa Pablo	1,18	1,01	0,64	0,81	0,79	0,52	1,60
Avilé	1,05	0,74	1,48	1,48	1,55	0,71	0,61
Edén	0,77	2,20	0,81	0,57	0,64	1,50	0,60
Volcán	0,50	1,36	0,78	0,71	0,78	0,37	0,51
Porfín	0,48	2,00	0,52	0,43	0,37	0,30	0,43
Normandía	2,90	2,80	0,86	0,64	0,89	1,22	0,60
Finca	Zn	da10	da20	da30	da40	da50	I
Madona	0,29	0,98	0,79	0,74	0,76	1,00	0,51
San Pablo	0,17	0,64	1,00	0,46	0,88	0,91	0,85
Avilé	0,20	1,17	0,62	0,77	0,54	0,55	1,35
Edén	0,40	1,02	0,79	1,44	1,56	0,86	1,17
Volcán	1,33	0,31	0,63	0,45	0,72	0,79	0,48
Porfín	0,29	0,51	0,73	1,09	0,44	0,72	0,86
Normandía	0,35	1,11	0,47	0,67	0,72	0,62	2,40
Finca	PE	Ar	IE	DPM			
Madona	0,59	0,26	1,33	0,91			
San Pablo	0,91	0,71	1,05	0,48			
Avilé	1,55	1,28	0,74	0,94			
Edén	0,78	0,95	0,87	0,82			
Volcán	0,45	0,83	0,52	1,00			
Porfín	0,63	0,54	0,50	0,84			
Finca "Normandía"	3,00	3,30	2,90	2,80			

MO: materia orgánica, CIC: capacidad intercambio catiónico, Da: densidad aparente, I: infiltración, PE: profundidad efectiva, Ar: arcilla, IE: índice de estructura, DPM: diámetro ponderado medio

Es importante anotar que, pese a que los municipios de Santa Marta y Ciénaga presentaron alta calidad de suelo para la producción de mango

de azúcar, la productividad va a depender además de otros factores como las prácticas de manejo agronómico implementadas y la variabilidad

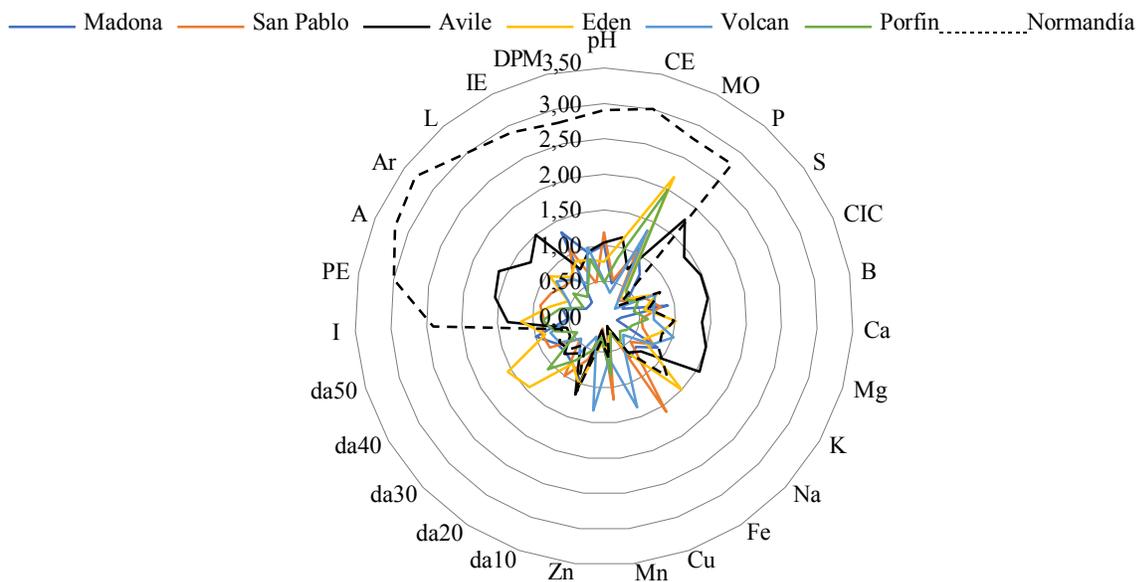
espacial en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de las fincas, es decir, la productividad sería más homogénea en la medida que exista menos variabilidad espacial en las propiedades del suelo. Por su parte, la moderada

calidad de suelo en la finca Normandía es una condición específica para esta finca en el municipio y no necesariamente representaría un reflejo de las condiciones o clasificación del resto de fincas o predios agropecuarios del municipio.

**Cuadro 8.** Índice de propiedades físicas y químicas de suelo en siete fincas productoras de mango de azúcar (*Mangifera indica* L.) en el departamento del Magdalena, Colombia

Fincas	Ipf	Ipq	ICAS
Madona	8,49	9,25	8,87
San Pablo	8,32	9,125	8,72
Avilé	9,10	9,125	9,11
Edén	9,10	11,25	10,18
Volcán	9,50	10,375	9,94
Porfin	9,40	10,5	9,95
Normandía	4,6	6,375	5,49

Ipf: índice de propiedades físicas, Ipq: índice de propiedades químicas, ICAS: índice de calidad del suelo



**Figura 1.** Caracterización gráfica de indicadores de calidad de suelo para la producción de mango de azúcar (*Mangifera indica* L.) en el departamento del Magdalena, Colombia

## DISCUSIÓN

El uso de los indicadores de la calidad del suelo propuesto es una herramienta útil para la toma de decisiones sobre la identificación de zonas potenciales para la producción de mango de azúcar, además que pueden ser una herramienta para la toma de decisiones sobre el manejo del suelo y la nutrición de las plantas, ya que estos son sensibles al manejo en el corto, mediano y largo plazos, con dependencia de la propiedad y del suelo que se evalúe (Estrada et al., 2017). Por ejemplo, en el caso de la textura del suelo, para

percibir cambios se necesitarían muchos años (Arnold et al., 1990); sin embargo, los cambios en la tasa de infiltración pueden percibirse en menos de un año (Arshad y Coen, 1992). Así ocurre para un conjunto de propiedades que, bien manejadas, pueden reflejar un diagnóstico sensible de la calidad de un suelo determinado, por lo cual, los indicadores tienen que relacionarse con la función principal que desempeña (Castillo et al., 2021), que para nuestro caso es la definición de zonas potenciales en función de las características físicas y químicas del suelo.

En el presente estudio, el pH fue la variable química más importante para la elaboración del índice de calidad; el pH promedio fue de 7,19. Se sabe que el rango de pH óptimo para el crecimiento del mango está entre 5,5-7,5; aunque el árbol puede crecer a pH por debajo de 5,5 su crecimiento se ve seriamente afectado (Bally, 2006). El pH influye en la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Zhang et al., 2020), valores más elevados promueven deficiencias nutricionales de Fe, Cu, Mn, Zn y P. Por su parte valores inferiores a 5,5 presentan restricciones en la disponibilidad de P y solubilización de Al, el cual es limitante para el cultivo (Galán, 2009). La importancia del pH en la elaboración de los índices de calidad de este estudio se debe a que pequeños cambios del pH pueden provocar grandes cambios en la rizosfera, regulando toda la química de las soluciones coloidales de nutrientes de las plantas. Más allá de ciertos niveles de pH, se inducen en las plantas múltiples factores de estrés, como la toxicidad por iones de hidrógeno y el desequilibrio de nutrientes, toxicidades y deficiencias en las plantas (Msimbira y Smith, 2020).

Otros indicadores de propiedades químicas tomadas en cuenta en el índice de calidad de suelo propuesto son la CE que influye la capacidad de la raíz para absorber los nutrientes de la solución de fertilizantes aportada (Gutiérrez et al., 2017); la MO que tiene un efecto positivo en la productividad y propicia la formación de agregados y mejora la estructura del suelo, lo que promueve el incremento de los flujos de agua, aire y calor (Álvaro et al., 2009), y la CIC que se relaciona con la fertilidad del suelo, siendo mayor en la medida que aumenta su valor. Finalmente, los nutrientes B, K, Fe y Zn conforman el listado de indicadores que hacen parte del modelo de índice de calidad de suelo propuesto, y cuya influencia se enmarca en la nutrición de las plantas.

La propiedad física del suelo de mayor peso en el índice de calidad propuesto fue el contenido de arena, el cual tiene participación directa en la estructura y la textura del suelo, siendo franco arenosa la condición más favorable para el desarrollo del cultivo (Arcila et al., 2022). Otro de los indicadores relevantes en los índices de calidad de suelo son la estabilidad estructural y densidad aparente (Sarmiento et al., 2018), la cual

debe analizarse en función de la profundidad, pues muchas veces se presentan limitantes físicas en todo el perfil del suelo como es la compactación, que impide un desarrollo radical adecuado y con ello limita a la planta para tomar agua y nutrientes adecuadamente (Urinovsky et al., 2021).

Los indicadores propuestos para evaluar la calidad del suelo cumplen con los criterios más importantes para la utilización como indicadores, es decir, son integradores, sensibles a los cambios que sufre el suelo, deben correlacionarse con los procesos del ecosistema, de fácil medición e interpretación (Sarmiento et al., 2018). Se trata de indicadores del suelo que integran información de otros asociados e incorpora indicadores físicos y químicos de fácil medición. Los indicadores seleccionados reflejan, en términos de calidad, los cambios en cada una de las propiedades.

Se descartaron indicadores que, si bien forman parte de listas muy usadas en otras partes del mundo (Doran y Safley 1997), no tuvieron un efecto o influencia de consideración sobre el desarrollo del cultivo de mango de azúcar en el departamento del Magdalena. Estos resultados representan una alternativa para la identificación de nuevas áreas potenciales para siembra del cultivar; sin embargo, es importante destacar que los indicadores propuestos deben cumplir el principio del modelo que constantemente debe validarse y ajustarse en función de los cambios del ecosistema, es decir, deben ser dinámicos y actualizados en el tiempo pues la realidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo pueden variar en función de los factores formadores del suelo y de las prácticas de manejo.

## CONCLUSIONES

La productividad y los indicadores pH, MO, CIC, B, K, Na, Fe, Zn, Da1, Da2, Da3, Da4, Da5, I, PE, Ar, IE y DPM definieron el índice de calidad de suelo propuesto para la producción de mango de azúcar.

El índice propuesto resultó ser una buena alternativa para la categorización de los indicadores en función de las propiedades físicas y químicas del suelo.

El monitoreo de los valores del índice representa una herramienta útil que puedan ayudar a los agricultores y a los tomadores de decisiones a implementar acciones que permitan seleccionar áreas potenciales para la producción de mango de

azúcar en función de la calidad del suelo, contribuyendo de esta manera en el manejo de suelo con enfoque sostenible.

### AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue generado a partir del proyecto ID1001212 “Estrategias de manejo del riego y la nutrición en periodos críticos de sequía para la producción sostenible de mango en zonas productoras de Colombia” y financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia.

Investigación realizada por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA, con recursos recibidos en el marco de la ley 1731 de 2014. Los autores expresan su gratitud a los productores que ayudaron en la implementación de la investigación.

### LITERATURA CITADA

1. Acevedo, I., A. Sánchez y B. Mendoza. 2021. Evaluación del nivel de degradación del suelo en dos sistemas productivos en la depresión de Quíbor. II. Calidad del suelo. *Bioagro* 33(2): 127-134.
2. Agronet, 2022. Evaluaciones Agropecuarias Municipales 2022. Grupo de estadística e información sectorial – Oficina de Planeación y Prospectiva – Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá, Colombia. <http://www.agronet.gov.co/estadística> (marzo de 2023).
3. Álvaro-Fuentes, J., C. Cantero Martínez, M. López, K. Paustian, K. Denef, C. Stewart y J. Arrúe. 2009. Soil aggregation and soil organic carbon stabilization: Effects of management in semiarid mediterranean agroecosystems. *Soil Sci. Soc. J.* 73: 1519-1529.
4. Andrews, S.S. y C.R. Carroll. 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem Management. *Ecological Applications* 11(6): 1573–1585.
5. Arcila-Cardona, A., G. Castillo-Urquiza, L. Pérez-Artiles, C. Abaunza-González, M. Yacomelo-Hernández y R. León-Pacheco. 2022. Modelo productivo de mango de azúcar (*Mangifera indica L.*) para el departamento del Magdalena. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia.
6. Arnold, R.W., I. Szabolcs y V.O. Targulian (eds.). 1990. *Global Soil Change: Report of the International Institute for Applied Systems Analysis, International Society of Soil Science, United Nations Environmental Programme: Task Force on the Role of Soil in Global Change. Analysis.* <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/3458/1/CP-90-002.pdf> (consulta de agosto 30, 2022).
7. Arshad, M. y G. Coen. 1992. Caracterización de la calidad del suelo: Criterios físicos y químicos. *Diario Americano de Agricultura Alternativa* 7(1-2): 25-31.
8. Bally, I.S.E. 2006. *Mangifera indica* (mango). In: C.R. Elevitch (ed.). *Species profiles for Pacific island agroforestry.* Hawaii: Permanent Agriculture Resources-PAR, <http://www.agroforestry.net/tti/Mangifera-mango.pdf> (consulta de agosto 30, 2022).
9. Bünemann, E.K., G. Bongiorno, Z. Bai, R.E. Creamer, G. De Deyn, R. de Goede et al. 2018. Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120: 105-125.
10. Castillo-Valdez, X., J. D. Etchevers, C.M. Hidalgo-Moreno y A. Aguirre-Gómez. 2021. Soil quality evaluation: Generation and interpretation of indicators. *Terra Latinoamericana* 39: 1-12.
11. Cetin, M., y A. A Jawed. 2022. Variation of Ba concentrations in some plants grown in Pakistan depending on traffic density. *Biomass Conv. Bioref.* 2022: 1-7.
12. Doran, J. W. y Safley, M. 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. *Biological indicators of soil health.* New York: CAB International. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US1997059134> (consulta de agosto 20, 2022).
13. Estrada Herrera, I.R., C. Hidalgo-Moreno, R. Guzmán-Plazola, J.J. Almaraz-Suárez, H. Navarro-Garza y J.D. Etchevers-Barra. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia* 51(8): 813-831
14. FAOSTAT. 2021. Producción mundial de mango. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>. (consulta de marzo 10, 2023).

15. Galán-Saucó, V. (2009). El cultivo del Mango. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. Ediciones Mundi Prensa. Madrid.
16. Glover, J.D., J.P. Reganold y P.K. Andrews. 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture, Ecosystems y Environment* 80(1): 29-45.
17. Gutiérrez, J., W.A. Cardona y O. Monsalve. 2017. Potencial en el uso de las propiedades químicas como indicadores de calidad de suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 11(2): 450-458.
18. Jaramillo, D. 2011. El Suelo: origen, propiedades y espacialidad. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 553 p.
19. Lal, R. 2016. Soil health and carbon management. *Food Energy Secur.* 5: 212-222.
20. Li, X., W.J. Zhang, L. Wu, Y. Ren, J.D. Zhang y M.G. Xu. 2021. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation. *Sci. Agric. Sin.* 54: 3043-3056.
21. Msimbira, L. y D. Smith. 2020. The roles of plant growth promoting microbes in enhancing plant tolerance to acidity and alkalinity stresses. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4: 106
22. Osorio, N. 2014. Manejo de Nutrientes en Suelos del Trópico. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 416 p.
23. Raiesi, F., y V. Kabiri. 2016. Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. *Ecological Indicators* 71: 198-207.
24. Rubiano, Y.A.C y N. Beaulieu. 2005. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad de suelos para los Llanos Orientales de Colombia Estudio de caso: municipio de Puerto López, Meta. *Acta Agronómica* 54(3): 1-10.
25. Sarmiento-Reyes, E.B., S.A. Fandiño-Zabalay L. Gómez-Echeverri. 2018. Índices de calidad del suelo. una revisión sistemática: *Ecosistemas* 27(3): 130-139.
26. Urinovsky-Irigoyen, K., D. Toledo, S. Arzuaga, M. Acosta y S. Contreras-Leiva. 2021. Indicadores de calidad física en suelos del Chaco semiárido bajo distintos sistemas. *Agrotecnia* 31: 5-13.
27. USDA, D. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. US Department of Agriculture. pp. 56-57.
28. Yacomelo-Hernández, M.J., M. Ramírez-Gómez, U. Pérez-Moncada, A. Arcila-Cardona, F. Carrascal-Pérez y E. Florez-Cordero. 2021. Nutritional analysis and extraction levels in mango 'Azucar' in Magdalena State, Colombia. *Bioagro* 33(2): 79-90.
29. Yin H., B. Yu, Z. Zhang, L. Jia, J. Xue, X. Chen et al. 2022. Evaluating the impact of different afforestation timescales on the soil quality in a typical watershed valley using the criteria importance through intercriteria correlation method and gray target model. *Front. For. Glob. Change* 5: 997949.
30. Yu, P., S. Liu., L. Zhang., Q. Li., y D. Zhou. 2018. Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. *Science of the Total Environment*. pp. 564-571, 616-617.
31. Zhang, J., B. Li, J. Zhang, P. Christie y X. Li. 2020. Organic fertilizer application and Mg fertilizer promote banana yield and quality in an Udic Ferralsol. *Plos One* 15(3): e0230593.

