Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia

Diagnóstico de la calidad del suelo en dos condiciones de producción de banano y un bosque secundario de Costa Rica

José P. Vargas Fernández[1*], Lidieth Uribe Lorío[2], Ronald Romero Calderón[3], Jorge A. Leiva Sanabria[4]

[1]Escuela de Agronomía. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. [2]Facultad de Agronomía. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. [3]Fresh Del Monte Produce. San José, Costa Rica. [4]Escuela de Agronomía. Sede Guanacaste. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

***Autor de correspondencia:**
José P. Vargas Fernández
jose.vargasfernandezcr.ac.cr

Contribución:
Artículo Científico

Sección:
Manejo de suelos y Nutrición química y orgánica

Recibido:
15 diciembre, 2025
Publicado:
30 abril, 2026

Cita:
Vargas Fernández JP, Uribe Lorío L, Romero Calderón R, Leiva Sanabria JA. 2026. Diagnóstico de la calidad del suelo en dos condiciones de producción de banano y un bosque secundario de Costa Rica. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 138 https://doi.org/10.62498/ARTC.26138

RESUMEN

La disminución de la calidad del suelo afecta la sostenibilidad de la producción de banano en Costa Rica. Mejorar los factores limitantes del suelo aumenta su calidad y asegura la continuidad productiva. El objetivo de este estudio fue comparar la calidad del suelo en condiciones de alta productividad (AP), baja productividad (BP) y un bosque secundario maduro (BM) en la Región Huetar Atlántica, mediante indicadores e índices de calidad. Se recolectaron 25 muestras compuestas por condición (0–30 cm) y se analizaron indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo, junto con variables biométricas y nutricionales de la planta. La evaluación se realizó en tres etapas: (I) selección de indicadores en un conjunto total (TDS) y dos reducidos (MDS-PCA y MDS-EO); (II) interpretación mediante las metodologías marco de evaluación del manejo de suelos (SMAF) y distribución normal acumulativa (CND), que asignan puntajes entre 0 y 1; y (III) cálculo de índices de calidad (InCS) bajo un enfoque aditivo simple. Los resultados mostraron que BM presentó mayor carbono orgánico total, biomasa microbiana y diversidad funcional. AP sobresalió en desempeño biométrico, retorno de biomasa y actividad enzimática, mientras que BP se caracterizó por compactación subsuperficial, necrosis radicular y altas concentraciones de Fe y Mn, aunque con mayores contenidos de nutrientes en suelo y tejido foliar. La integración de los indicadores reflejó un gradiente de calidad BM > AP > BP, consistente con el desempeño productivo. Se concluye que los conjuntos reducidos, especialmente MDS-PCA, fueron más sensibles y eficientes que el TDS. Ambas metodologías fueron consistentes, aunque la CND se limitó por no incluir indicadores biológicos.

Palabras clave: Indicadores, Índice de calidad de suelo, Productividad

ABSTRACT

Soil quality decline threatens the sustainability of banana production in Costa Rica. Addressing soil limiting factors improves its quality and ensures long-term productivity. The objective of this study was to compare soil quality under high productivity (AP), low productivity (BP), and a mature secondary forest (BM) in the Huetar Atlántica region, using soil quality indicators and indices. A total of 25 composite samples per condition (0–30 cm) were collected, and chemical, physical, and biological soil indicators were analyzed, along with plant biometric and nutritional variables. The evaluation included three steps: (I) selection of indicators in a total set (TDS) and two reduced sets (MDS-PCA and MDS-EO); (II) interpretation using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) and Cumulative Normal Distribution (CND) methodologies, which assign scores between 0 and 1; and (III) integration of indicators into soil quality indices (InCS) using an additive approach. Results showed that BM presented higher total organic carbon, microbial biomass, and functional diversity. AP stood out for superior biometric performance, biomass return, and enzymatic activity, while BP was characterized by subsurface compaction, root necrosis, and high Fe and Mn concentrations, although it also showed higher contents of macro- and micronutrients in soil and foliar tissue. The integration of indicators reflected a soil quality gradient of BM > AP > BP, consistent with the productivity levels observed. It is

Copyright: © 2026 por los autores. Licencia Acorbat Internacional. Este artículo es de acceso libre y distribuido bajo los términos de Acorbat Internacional

concluded that reduced indicator sets, particularly MDS-PCA, were more sensitive and efficient than the full set. Both methodologies were consistent, although CND was limited by the absence of biological indicators.

Keywords: Indicators, Soil quality index, Productivity

INTRODUCCIÓN

El banano es una de las frutas más consumidas en el mundo y figura entre los principales productos de exportación de Costa Rica, donde se cultiva en más de 42 000 hectáreas y genera alrededor de 100 millones de cajas anuales para los mercados internacionales. Además de su peso en la economía nacional, este cultivo ha tenido un papel histórico en el desarrollo social y productivo de la Región Huetar Atlántica, constituyéndose como un pilar de empleo y dinamización de comunidades rurales (CORBANA, 2024).

El crecimiento de la actividad bananera se sustentó en un modelo de monocultivo intensivo que, aunque permitió responder a la creciente demanda mundial, implicó un uso elevado de agroquímicos y prácticas de manejo enfocadas en maximizar la productividad lograda y sostenida hasta el día de hoy (CORBANA, 2024). Este proceso también se vinculó con la expansión sobre áreas forestales y con el establecimiento de plantaciones en suelos de baja aptitud agrícola, lo que aceleró el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Bellamy, 2013).

A mediano plazo, la degradación del suelo se tradujo en la reducción de la productividad, documentada en distintos países de América Latina y en Costa Rica. En plantaciones con más de siete años de explotación continua, se han reportado disminuciones de 100 a 300 cajas por hectárea al año, mientras que en otras regiones como Panamá o Venezuela las pérdidas fueron aún más marcadas, reflejando un patrón regional de disminución en el rendimiento asociado a la pérdida de calidad del suelo (Vargas-Fernández, 2024).

Frente a este panorama, los índices de calidad de suelo, construidos a partir de indicadores físicos, químicos y biológicos, se han consolidado como una herramienta para evaluar y monitorear la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Bünemann et al., 2018). En este marco, el presente trabajo comparó la calidad del suelo bajo tres condiciones contrastantes: una plantación de alta productividad, otra de baja productividad y un bosque secundario, en la Región Huetar Atlántica de Costa Rica, con el fin de generar evidencia actualizada que oriente prácticas de manejo más sostenibles.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en finca Tortuguero (Cariari, Pococí, Limón), una zona de bosque muy húmedo tropical con 5 000 - 6 000 mm de lluvia anual, ~26 °C de temperatura media y altitudes de 0 - 30 m s. n. m (Figura 1). Se evaluaron tres condiciones contrastantes: una plantación de alta productividad (AP) (~2 433 cajas ha^{-1} $año^{-1}$), otra de baja productividad (BP) (~2 144 cajas ha^{-1} $año^{-1}$), ambas sembradas en 1992 con *Musa* AAA 'Valery', y un bosque secundario maduro (BM) sin intervención por ~30 años. Los suelos se clasificaron como *Dystric Fluventic Eutrudepts* (BP) y *Andic Dystrudepts* (AP y BM).

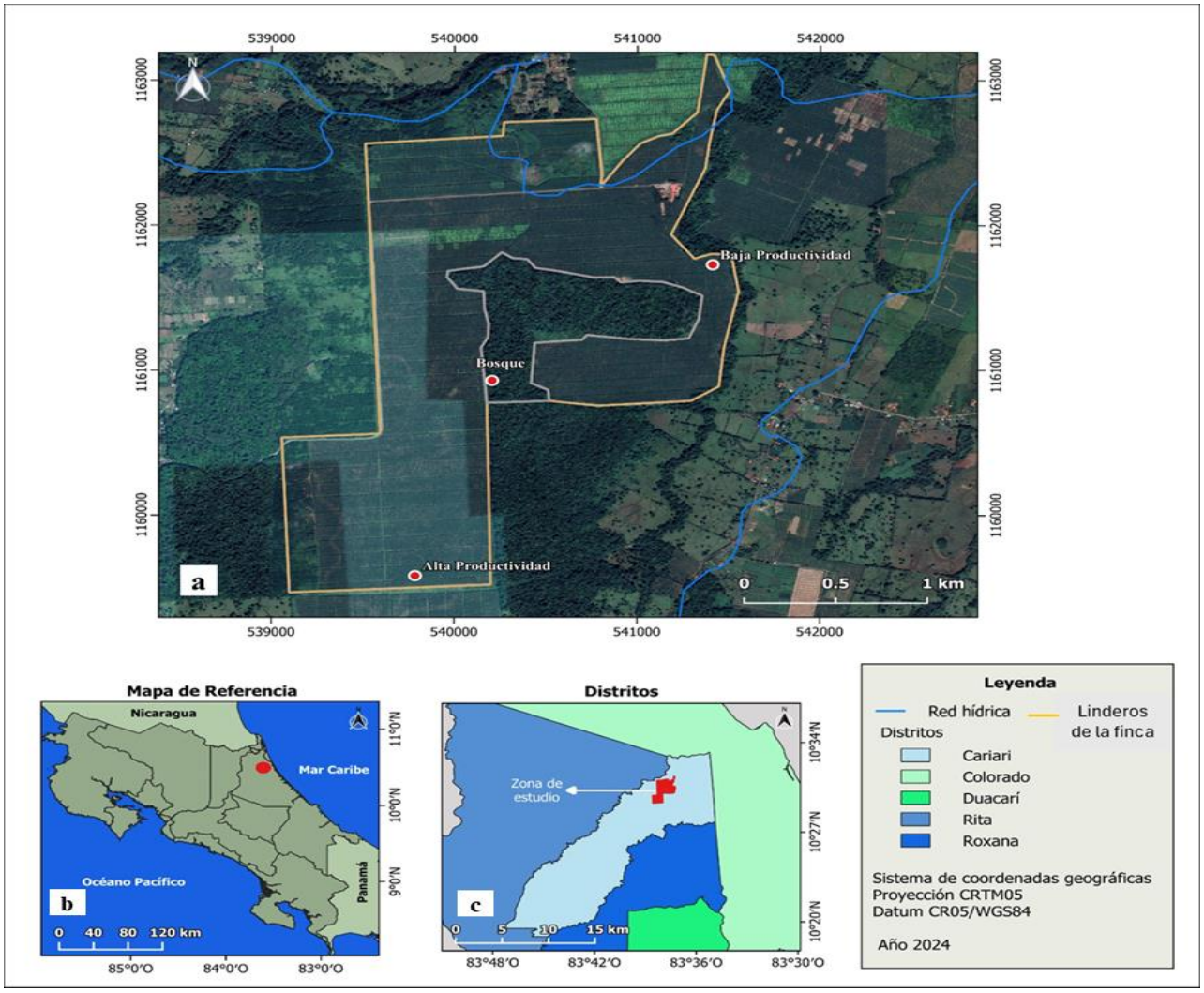


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio en finca Tortuguero (a). Localización de la finca en la provincia de Limón (b) y en el distrito de Cariari (c).

El muestreo (octubre–noviembre 2023) se efectuó en ~1,5 ha por condición (AP/BP) mediante recorridos en zigzag; en BM se definió un polígono de 4,5 ha. Se recolectaron 25 muestras compuestas de suelo (0 - 30 cm) por condición (tres submuestras por punto), con separaciones de 20 - 60 m (AP/BP) y 10 - 12 m (BM). En AP/BP las muestras se tomaron en la banda de fertilización frente al hijo de sucesión; en BM se muestreó en claros para evitar raíces de árboles grandes. Adicionalmente, se abrieron fosas 2×2×2 m para medir algunas variables fisicoquímicas a mayor profundidad.

En AP y BP se midieron variables biométricas en 100 plantas por condición (hojas funcionales, circunferencia, altura del hijo y número de manos por racimo) en estados de floración y 11–12 semanas post-embolse. El estado nutricional se evaluó en hoja 3 (segmento central del semilimbo, sin vena), con 25 muestras foliares por sitio. Para el sistema radical, se tomaron 25 monolitos por condición en la interfase madre-hijo (hoyos de 15×15×30 cm; 6 750 cm^3), recolectando la biomasa de la raíz funcional y contando los nematodos fitoparásitos y saprófitos. En suelo se determinaron nutrientes (Mehlich III – ICP/OES), pH y CE, acidez/Al intercambiable, carbono orgánico total (combustión seca), y propiedades físicas: textura (hidrómetro), densidad aparente, resistencia a la penetración, retención de humedad (CC y PMP) y estabilidad de agregados (tamizado en húmedo). En tejido foliar se analizaron macro y micronutrientes (digestión asistida por microondas e ICP/OES; N por combustión). La dimensión biológica incluyó carbono de biomasa microbiana, respiración, deshidrogenasa y β-glucosidasa, además de la huella metabólica con Biolog® EcoPlate™ (AWCD a 72 h, índices de Shannon y Simpson y similitud), leídos a 590 nm.

La calidad del suelo se abordó en tres pasos: (I) selección de indicadores (ICS), un conjunto total (TDS), uno reducido por PCA (MDS-PCA) y otro por criterio de expertos (MDS-EO); (II) interpretación mediante el Marco de evaluación del manejo de suelos (SMAF por sus siglas en inglés) (Andrews et al., 2004) y Distribución Normal Acumulativa (CND por sus siglas en inglés) (Moebius-Clune et al., 2016), asignando puntajes entre 0-1 a cada indicador utilizando curvas no lineales; y (III) integración en índices (InCS) bajo un enfoque aditivo simple. Se calcularon índices con combinaciones químico-físico-biológicas (qfb), químico-físicas (qf) y completos (c) que incluyen las químico-físicas y las variables biometricas, raíces y estado nutricional foliar. El análisis estadístico contempló descriptivos, verificación de normalidad y homocedasticidad, ANOVA de una vía ($\alpha = 0,05$), transformaciones cuando fue necesario, Tukey para comparaciones múltiples, PCA (varianza acumulada

≥ 80 %, eigenvalues > 1, rotación varimax) y correlaciones de Pearson para depurar redundancias y retener los indicadores más informativos.

RESULTADOS Y DISCUSION

La textura explicó buena parte de los contrastes observados: AP (alta productividad) y BM (bosque maduro), clasificados como Franco Arenoso y Franco Limoso, muestran potencial edáfico alto para banano, mientras que BP (baja productividad), Franco Arcillo Limoso, presenta potencial medio-bajo y mayor compactación (Jaramillo y Vázquez 1980). Esa compactación en BP (0 - 100 cm) coincide con raíces necrosadas y alta resistencia del suelo a la penetración subsuperficial (RSSP), pese a que el agua disponible se mantuvo cercano al rango óptimo (~20 % de humedad volumétrica) (Vaquero 2003). La mayor estabilidad de agregados en BP se asocia al mayor limo y arcilla, y en BM al mayor carbono orgánico total (COT); en AP, la arena redujo dicha estabilidad.

La mayor disponibilidad de nutrientes en suelos cultivados, sobre todo en BP, se explica por su mayor capacidad de intercambio catiónico y por menor extracción de nutrientes asociada al bajo vigor, mientras BM refleja un ciclaje natural más equilibrado (Pérez y Torres-Bazurto 2020). El COT superior en BM y alto en AP (por el retorno de ~66 % de la biomasa en plantaciones vigorosas) contrasta con BP. Las concentraciones elevadas de Fe y Mn en BP, junto con rasgos redoximórficos y pérdida de raíz funcional a 90-150 cm, sugieren limitaciones de drenaje (Vaquero 2003). A nivel de planta, AP confirmó mayor desempeño en las variables biométricas: circunferencia del pseudotallo en floración y cosecha, hojas por planta en floración, altura del hijo en cosecha y manos por racimo, mientras que las mayores concentraciones foliares de Ca, Mg, Mn, Zn y Cu en BP fueron coherentes con su disponibilidad en el suelo.

En el plano biológico, BM sobresalió en desarrollo de color promedio medido con Biolog® EcoPlate™, diversidad funcional (índice de Shannon), riqueza de sustratos y carbono de la biomasa microbiana; en AP destacó la actividad de la enzima deshidrogenasa, mientras que en BP se registraron los valores más bajos de actividad de la enzima β-glucosidasa (Durango *et al.* 2015). Estas diferencias podrían estar influenciadas por el COT, que fue superior en BM y proporcionó fuentes estables de carbono que favorecieron la acumulación de biomasa microbiana, mientras que en los sitios cultivados (AP y BP), con menor diversidad y cantidad en los aportes de fuentes de COT habría estimulado principalmente la actividad biológica enzimática (Henríquez *et al*., 2014).

Integrando la calidad de suelo, los índices (InCS) ubican a BM en la parte alta, AP en nivel intermedio y BP en regular, alineando el gradiente edáfico-biológico con el productivo (Figura 2). Los conjuntos reducidos superan al total (TDS, 51 indicadores) por evitar redundancias y enfocarse en variables diagnósticas: el MDS-PCA (conjunto reducido por análisis de componentes principales) ofrece una selección objetiva de indicadores (textura, K y Na, pH, COT, RSSP y variables biométricas), mientras el MDS-EO (conjunto reducido por criterio experto y literatura) coincide en indicadores esenciales (textura, CIC, pH, acidez intercambiable, COT, RSSP y variables biométricas del cultivo), ambos con menores costos de medición que TDS (Marion *et al.* 2022).

Tanto SMAF como CND fueron consistentes para estimar índices de calidad de suelo, aunque presentan diferencias en su aplicabilidad. SMAF es una herramienta ampliamente validada y flexible que integra indicadores físicos, químicos y biológicos, pero sus rangos de interpretación, ajustados al cultivo y sitio, limita su extrapolación sin realizar ajustes. En contraste, CND utilizó una base de datos local, por lo que ofrece una interpretación objetiva a partir de promedios y desviaciones estándar, lo que la hace eficiente cuando existe amplia información disponible; sin embargo, su principal limitación es la ausencia de indicadores biológicos en la base de datos, lo que restringe su uso en contextos con poca información.

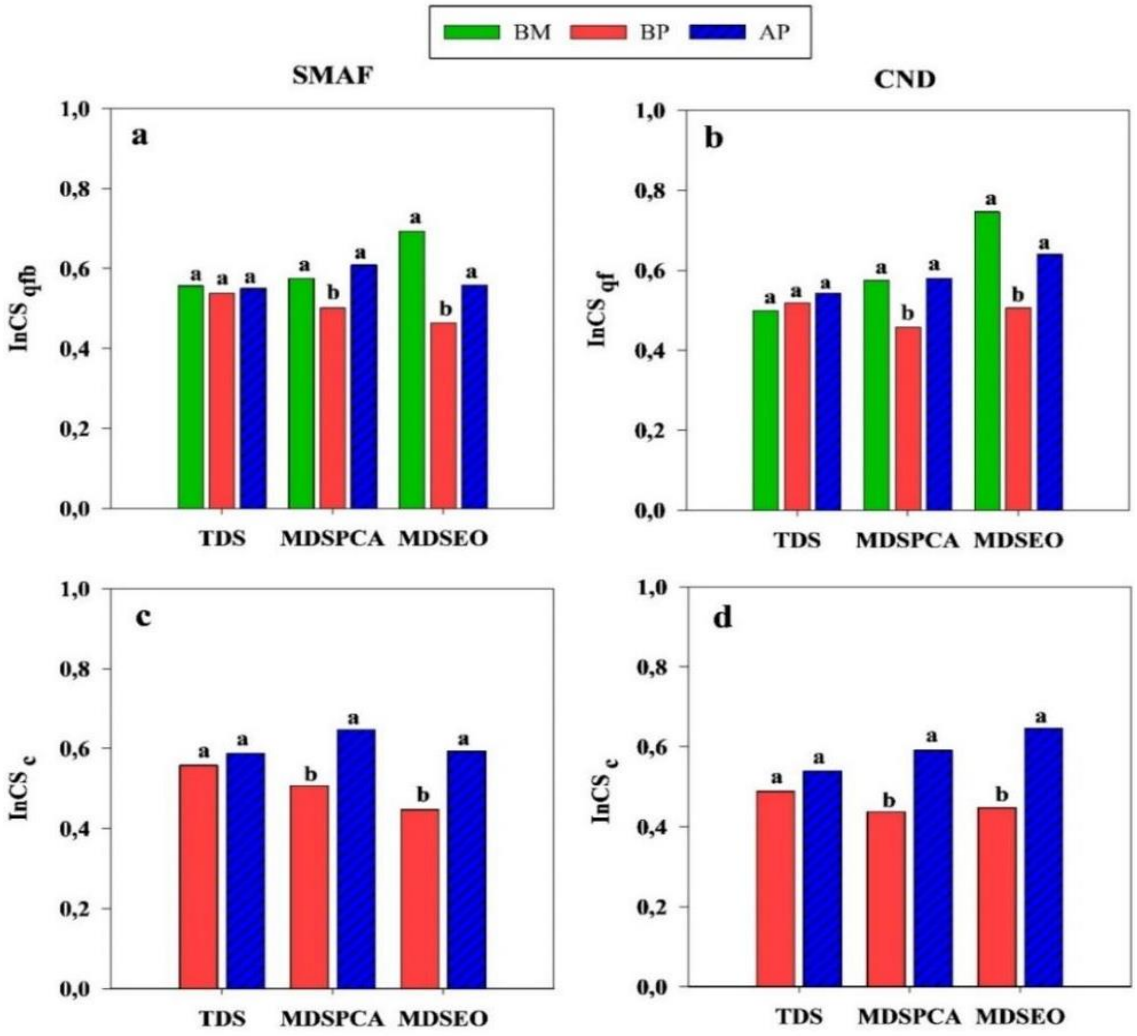


Figura 2. Índices de calidad de suelo en bosque (BM) y banano de alta (AP) y baja (BP) productividad, obtenidos con tres conjuntos de indicadores (TDS, MDS PCA y MDS EO) y dos metodologías, marco de evaluación del manejo de suelos (SMAF) y distribución normal acumulativa (CND). $InCS_{qfb}$: índice combina indicadores químico-físico-biológicos. $InCS_{qf}$: índice combina indicadores químico-físicos. $InCS_c$: índice combina indicadores químico-físicos-biologicos y las variables biometricas, raíces y estado nutricional foliar. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

En conclusión, la condición AP presentó mejores indicadores físicos, biológicos y biométricos, lo que se reflejó en un mayor índice de calidad en comparación con la condición BP. En relación con BM, ambos sistemas cultivados mostraron mayor compactación, fertilidad química y acidez, pero menor carbono orgánico total y actividad biológica, resultando en la jerarquía de calidad BM > AP > BP.

Las metodologías empleadas (SMAF y CND) fueron consistentes, aunque la CND presentó limitaciones por no incluir indicadores biológicos. Además, los conjuntos de indicadores reducidos (MDS PCA y MDS EO) demostraron mayor sensibilidad que el total de indicadores (TDS), destacando el MDS PCA como la opción más robusta al minimizar redundancias y subjetividades, por lo que se recomienda su uso en evaluaciones de la calidad del suelo en plantaciones de banano bajo condiciones similares.

REFERENCIAS

Andrews S, Karlen D, Cambardella C. 2004. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. Soil Science Society of America Journal 68(6):1945-1962.

Bellamy A. 2013. Banana production systems: Identification of alternative systems for more sustainable production. Ambio 42(3):334–343.

Bünemann E, Bongiorno G, Bai Z, Creamer R, De Deyn G, de Goede R, Fleskens L, Geissen V, Kuyper T, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, van Groenigen J, Brussaard L. 2018. Soil quality–A critical review. Soil Biology and Biochemistry 120: 105-125.

CORBANA. 2024. Estadísticas de exportación bananera 2023. San José, Costa Rica, Mundo creativo S.A. 72 p.

Durango W, Uribe L, Henríquez C, Mata R. 2015. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. Agronomía Costarricense 39(1):59-68.

Jaramillo R, Vázquez A. 1990. Manual de procedimientos para la presentación y realización de estudios detallados de suelos y clasificación de tierras para el cultivo del banano. Departamento de Investigaciones, Asociación Bananera Nacional. San José, Costa Rica. 29 p.

Marion L, Schneider R, Cherubin M, Colares G, Wiesel P, da Costa A, Lobo E. 2022. Development of a soil quality index to evaluate agricultural cropping systems in southern Brazil. Soil and Tillage Research 218: 105293.

Moebius-Clune B, Moebius-Clune D, Gugino B, Idowu O, Schindelbeck R, Ristow A, van Es H, Thies J, Shayler H, McBride M, Wolfe D, Abawi G. 2016. Comprehensive Assessment of Soil Health–The Cornell Framework Manual. Cornell University. 134 p.

Pérez W, Torres Bazurto J. 2020. Carbon-nitrogen ratio in soils with fertilizer applications and nutrient absorption in banana (Musa spp. cv. Williams). Agronomía Colombiana 38(2):253-26.

Vaquero R. 2003. Soil physical properties and banana root growth. In International symposium: Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. (San José, Costa Rica). Turner W, Rosales F (Eds.). Proceedings. International Network for the Improvement of Banana and Plantain. Montpellier, France. p. 125.

Vargas-Fernandez JP. 2024. Evaluación de la calidad de suelos de alta y baja productividad en una finca bananera bajo manejo convencional en el Caribe de Costa Rica. Tesis Maestría en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José, Costa Rica.