

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUELOS DE ALTA Y BAJA PRODUCTIVIDAD EN UNA FINCA BANANERA BAJO MANEJO CONVENCIONAL EN EL CARIBE DE COSTA RICA



Generado con Copilot Microsoft©

JOSÉ PABLO VARGAS FERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUELOS DE ALTA Y BAJA PRODUCTIVI-
DAD EN UNA FINCA BANANERA BAJO MANEJO CONVENCIONAL EN EL
CARIBE DE COSTA RICA

Tesis sometida a la consideración del Programa de la Comisión del Programa de Estu-
dios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar por el grado y
título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis
en Suelos

JOSÉ PABLO VARGAS FERNÁNDEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2024

DEDICATORIA

A Dios, por la vida y la oportunidad de seguir formándome.

El apoyo de la familia es uno de los ingredientes indispensables para alcanzar metas. Dedico este trabajo a mi esposa e hijos, quienes, con su amor y comprensión, cedieron su tiempo para que yo pudiera estudiar y escribir. Su espera y paciencia han sido fundamentales para la realización de esta tesis. Gracias por ser mi fuente de inspiración y fortaleza.

AGRADECIMIENTOS

A Fresh Del Monte Produce y Corporación de desarrollo Agrícola Del Monte S.A (CDDAM), por su determinación para financiar y desarrollar este trabajo.

A Ronald Romero, por su guía, orientación y apoyo en la investigación y en mi desarrollo profesional.

Al esfuerzo, consejos y buenos ánimos de colegas y amigos: Walter Herrera, Luis Montero, Kevin Alvarado y Carlos Gómez.

Al personal de campo y laboratorio del Departamento de Investigaciones de CDDAM, por su apoyo en un arduo trabajo de campo.

A Lidieth Uribe, por su guía, consejo y apoyo para llevar a cabo este proyecto.

A Jorge Leiva, Rafael Mata, Roger Fallas, Juan Carlos Méndez y Mario Villatoro, por sus consejos y apoyo.

A Manuel Camacho, Yonner Manuel Céspedes y Rolando Hidalgo, por sus sugerencias y consejos para elaborar las figuras y gráficos de este trabajo.

A Luis Gómez por motivarme y recordarme la importancia de este importante paso profesional.

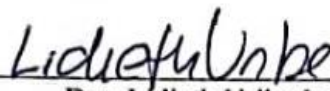
Al personal del Centro de Investigaciones Agronómicas, y del Centro de Investigación en Biología Celular y Molecular, de la Universidad de Costa Rica, por su apoyo en el trabajo de laboratorio.

Al Sistema de Estudios de Posgrado y al Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica por el financiamiento para la realización de los análisis de la actividad enzimática.


“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos.”



Dr. Roger Fallas Corrales
Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado



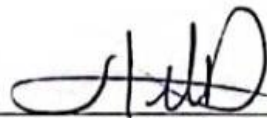
Dra. Lidieth Uribe Lorío
Directora de Tesis



Dr. Romulo Romero Calderón
Asesor



Dr. Jorge Leiva Sanabria
Asesor



Dra. Catalina Salas Durán
Directora Programa
Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales



Jose Pablo Vargas Fernández
Candidato

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----------|
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| RESUMEN | vii |
| ABSTRACT | viii |
| ÍNDICE DE CUADROS | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS | x |
| ANEXOS | xi |
| LISTA DE ABREVIATURAS | xii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVO GENERAL | 2 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| CAPÍTULO I. PAPEL DE LA CALIDAD DEL SUELO EN EL CULTIVO DE BANANO: RETOS Y OPORTUNIDADES ACTUALES | 3 |
| RESUMEN | 3 |
| INTRODUCCIÓN | 4 |
| Contexto global y desafíos para la sostenibilidad del cultivo de banano | 4 |
| Evolución del concepto de calidad del suelo y su relación con la productividad | 6 |
| Deterioro de la calidad en suelos cultivados con banano en Costa Rica | 8 |
| Estudios de la calidad de suelo en el cultivo banano | 10 |
| Evaluación de la calidad de suelo | 11 |
| Perspectivas del estudio de la calidad del suelo en el cultivo de banano en Costa Rica | 14 |
| CONCLUSIONES | 15 |
| CAPÍTULO II. GÉNESIS Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS BANANEROS DE ALTA Y BAJA PRODUCTIVIDAD Y UN SUELO DE BOSQUE EN EL CARIBE DE COSTA RICA | 17 |
| RESUMEN | 17 |
| INTRODUCCIÓN | 17 |
| Factores formadores | 18 |
| Material parental y mineralogía | 18 |
| Clima | 19 |
| Cobertura vegetal | 20 |
| Relieve, hidrografía y drenaje | 20 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 21 |
| Ubicación y zona de estudio | 21 |
| Fosas de observación | 22 |
| Análisis químicos, físicos y biológicos | 23 |
| RESULTADOS | 24 |
| Perfil de precipitación y temperatura | 24 |
| Descripción de los perfiles | 25 |
| Perfil del suelo de la condición BP | 25 |
| Características físicas y químicas de la condición BP | 25 |
| Perfil del suelo de la condición AP | 27 |

| | |
|---|-----------|
| Características físicas y químicas de la condición AP | 27 |
| Clasificación taxonómica de la condición AP | 28 |
| Perfil del suelo de BM | 29 |
| Características físicas y químicas del suelo de BM | 29 |
| Clasificación taxonómica del suelo de BM | 30 |
| CONCLUSIONES | 36 |
| CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUELOS DE ALTA Y BAJA PRODUCTIVIDAD EN UNA FINCA BANANERA Y UN BOSQUE EN EL CARIBE DE COSTA RICA | 37 |
| RESUMEN | 37 |
| INTRODUCCIÓN | 37 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 40 |
| Ubicación y generalidades de los sitios | 40 |
| Recolección de muestras y trabajo de campo | 41 |
| Análisis químicos, físicos y biológicos | 42 |
| Evaluación de la calidad del suelo | 43 |
| Análisis estadístico | 47 |
| RESULTADOS | 48 |
| Análisis e interpretación de indicadores físicos, químicos y biológicos | 48 |
| Análisis e interpretación de indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta | 52 |
| Evaluación de la calidad de suelo | 55 |
| DISCUSIÓN | 60 |
| Análisis de los indicadores físicos, químicos y biológicos | 60 |
| Análisis de los indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta . | 63 |
| Evaluación de la calidad del suelo | 63 |
| CONCLUSIONES | 65 |
| DISCUSIÓN GENERAL | 67 |
| CONCLUSIONES GENERALES | 68 |
| RECOMENDACIONES GENERALES | 69 |
| LITERATURA CITADA | 70 |
| ANEXOS | 90 |

RESUMEN

El presente trabajo resalta la importancia de abordar la evaluación de la calidad del suelo en el cultivo de banano en Costa Rica como herramienta para asegurar la sostenibilidad y productividad en esta actividad agrícola. En el primer capítulo, se realizó una revisión sobre la relación entre la calidad del suelo, la sostenibilidad y la productividad del cultivo de banano. Se destacó que la degradación del suelo debido a prácticas agrícolas intensivas ha afectado la productividad de las plantaciones bananeras en Costa Rica. El capítulo enfatiza la necesidad de un enfoque más integrado y detallado para evaluar los impactos del monocultivo y las prácticas agrícolas en la calidad del suelo. Se propone además la creación de índices regionales que incluyan la diversidad de condiciones en las que se cultiva el banano, proporcionando así herramientas para mejorar la gestión del suelo y asegurar la sostenibilidad del cultivo en el país. El segundo capítulo se enfoca en la génesis y clasificación de suelos de alta y baja productividad en una finca bananera y un suelo de un bosque secundario maduro en el Caribe de Costa Rica. Se describen los factores formadores del suelo, como el material parental, la mineralogía, el clima, la cobertura vegetal, y el relieve. Además, se presenta la clasificación taxonómica de los suelos estudiados y se analizan las características físicas y químicas de los perfiles de suelo en las diferentes ubicaciones. Los resultados muestran diferencias contrastantes en las propiedades intrínsecas del suelo entre las condiciones de producción de alta y baja productividad, así como en comparación con el suelo del bosque maduro, lo cual tiene implicaciones directas en la gestión y prácticas agrícolas necesarias para optimizar la producción. El tercer capítulo presenta una evaluación de la calidad del suelo en dos condiciones de producción de banano, alta y baja productividad y un suelo de un bosque secundario maduro. Se utilizaron indicadores físicos, químicos y biológicos para medir la calidad del suelo. Los resultados indican que los suelos de alta productividad presentan mejores indicadores de calidad en comparación con los suelos de baja productividad. Además, el estudio obtuvo un conjunto mínimo de indicadores para obtener índices de calidad de suelo en plantaciones de banano con condiciones similares y sienta las bases para futuras investigaciones.

ABSTRACT

This research highlights the importance of evaluating soil quality in banana cultivation in Costa Rica as a tool to ensure sustainability and productivity in this agricultural activity. In the first chapter, the relationship between soil quality, sustainability, and the productivity of banana cultivation is reviewed. It highlights how soil degradation due to intensive agricultural practices has affected the productivity of banana plantations in Costa Rica. This chapter emphasized the need for a more integrated and detailed approach to assessing the impacts of monoculture and agricultural practices on soil quality. It also proposed the creation of regional indices that reflect the diverse conditions in which bananas are grown, providing tools to improve soil management and ensure the crop's sustainability in the country. The second chapter focused on the genesis and classification of high and low productivity soils in a banana farm and a secondary mature forest in the Caribbean region of Costa Rica. Soil-forming factors such as parent material, mineralogy, climate, vegetation cover, and relief are described. In addition, the taxonomic classification of the studied soils is presented, and the physical and chemical characteristics of the soil profiles at different locations were analysed. The results showed significant differences in the intrinsic properties of the soils between high and low productivity plantations, as well as compared to the secondary mature forest. These differences had direct implications for the management practices necessary to optimize production. The third chapter presented an assessment of soil quality in high and low productivity banana plantations and secondary mature forest. Physical, chemical, and biological indicators were used to measure soil quality. The results indicated that high productivity soils had better quality indicators compared to low productivity soils. Additionally, the study identified a minimum set of indicators to develop soil quality indices in banana plantations with similar conditions, laying the foundation for future research.

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 2.1. Características químicas del suelo en los tres sitios estudiados: bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, baja productividad y alta productividad | 32 |
| Cuadro 2.2. Fertilidad disponible en el suelo en los tres sitios estudiados: bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, baja productividad y alta productividad | 33 |
| Cuadro 2.3. Características físicas y biológicas del suelo en los tres sitios estudiados: bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, baja productividad y alta productividad | 34 |
| Cuadro 2.4. Descripción morfológica y perfil de los tres suelos estudiados: bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, baja productividad y alta productividad | 35 |
| Cuadro 3.1. Tipo de ecuación utilizada para interpretar y transformar los indicadores a una escala de cero a uno, de acuerdo con la metodología SMAF | 46 |
| Cuadro 3.2. Indicadores y tipo de curva utilizada para interpretar y transformarlos a una escala de cero a uno, de acuerdo con la metodología CND | 47 |
| Cuadro 3.3. Indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo en un bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, alta productividad y baja productividad | 50 |
| Cuadro 3.4. Indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta en dos condiciones de producción de banano, alta productividad y baja productividad | 53 |
| Cuadro 3.5. Cargas factoriales en los cuatro componentes principales de los indicadores químicos, físicos y biológicos | 56 |
| Cuadro 3.6. Cargas factoriales en los cuatro componentes principales de los indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta | 57 |
| Cuadro 3.7. Indicadores de calidad de suelo utilizados para conformar los conjuntos reducidos MDS_{PCA} y MDS_{EO} | 58 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Histórico de rendimiento del cultivo de banano y área sembrada en Costa Rica, de 1961 a 2023 | 9 |
| Figura 1.2. Esquema interacción de factores químicos, físicos y biológicos que definen la calidad del suelo | 13 |
| Figura 2.1. Ubicación específica de cada una de las áreas estudiadas en finca Tortuguero, bosque secundario maduro y dos condiciones de producción de banano, alta productividad y baja productividad | 22 |
| Figura 2.2. Perfil de precipitación acumulada y evapotranspiración potencial promedio por mes | 24 |
| Figura 2.3. Perfil de temperaturas media, máxima y mínima promedio por mes | 25 |
| Figura 2.4. Perfil condición de cultivo BP (<i>Dystric Fluventic Eutrudepts</i>) | 26 |
| Figura 2.5. Perfil condición de cultivo AP (<i>Andic Dystrudepts</i>) | 28 |
| Figura 2.6. Perfil BM (<i>Andic Dystrudepts</i>) | 30 |
| Figura 3.1. Ubicación específica de cada una de las áreas estudiadas en finca Tortuguero, bosque secundario maduro y dos condiciones de producción de banano, alta productividad y baja productividad | 41 |
| Figura 3.2. Esquema utilizado para obtener los índices de calidad de suelo en un bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, alta productividad y una de baja productividad | 44 |
| Figura 3.3. Variación de la densidad aparente y la resistencia del suelo a la penetración a distintas profundidades en fosas de observación realizadas en un bosque y en dos condiciones de producción de banano, alta productividad y baja productividad | 49 |
| Figura 3.4. Variación de la capacidad de intercambio catiónica, carbono orgánico total, concentración de Fe y Mn a distintas profundidades en fosas de observación realizadas en un bosque y en dos condiciones de producción de banano, alta productividad y baja productividad | 51 |
| Figura 3.5. Puntaje, en escala de 0 a 1, asignado a los indicadores físicos, químicos y biológicos con las metodologías SMAF y CND en un bosque secundario maduro y dos condiciones de producción de banano, alta productividad y baja productividad | 54 |
| Figura 3.6. Puntaje, en escala de 0 a 1, asignado a los indicadores del cultivo con las metodologías SMAF y CND en condiciones de producción de banano, alta productividad y baja productividad | 55 |
| Figura 3.7. Índices de calidad de suelo en un bosque y en dos condiciones de producción de banano, alta productividad y baja productividad | 59 |

ANEXOS

- Anexo 1. Relación entre los indicadores preseleccionados y las funciones y amenazas del suelo_____90
- Anexo 2. Matriz de correlaciones de Pearson entre los indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo en los tres sitios estudiados: bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, baja productividad y alta productividad _____91
- Anexo 3. Matriz de correlaciones de Pearson entre los indicadores químicos, físicos, biológicos del suelo, biométricos y relacionados con el estado nutricional y sistema radical de la planta, en los tres sitios estudiados: bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, baja productividad y alta productividad _____92
- Anexo 4. Triángulo de textura de los suelos en los tres sitios estudiados: bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, baja productividad y alta productividad _____93
- Anexo 5. Biplot del análisis de componentes principales realizado a los indicadores químicos, físicos, biológicos del suelo en los tres sitios estudiados: bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, baja productividad y alta productividad_____94
- Anexo 6. Biplot del análisis de componentes principales realizado a los indicadores químicos, físicos, biológicos del suelo, además de los biométricos y relacionados con el estado nutricional y sistema radical de la planta, en los tres sitios estudiados: bosque maduro y dos condiciones de producción de banano, baja productividad y alta productividad_____95

LISTA DE ABREVIATURAS

- % ebms: Porcentaje en base materia seca.
% HV: Porcentaje de humedad volumétrica.
+ EM: Función "más es mejor".
AD: Agua disponible.
AEBg: Actividad enzimática de β -glucosidasa.
AEDh: Actividad enzimática de Deshidrogenasa.
AI: Acidez intercambiable.
AP: Alta productividad.
APC: Altura de hijo edad cosecha.
APF: Altura de hijo edad floración.
AVE: Promedio.
AWCD: Desarrollo de color promedio en el pozo.
B: Boro.
Bd: Densidad aparente.
BM: Bosque secundario maduro.
BP: Baja productividad.
Ca: Calcio.
CBM: Carbono de la biomasa microbiana.
CE: Conductividad eléctrica.
CIC: Capacidad de intercambio catiónico.
CND: Distribución normal acumulativa.
COEL: Coeficiente de extensibilidad lineal.
COT: Carbono orgánico total.
CPC: Circunferencia de planta edad cosecha.
CPF: Circunferencia de planta edad floración.
Cu: Cobre.
DIV (H'): Índices Shannon-Wiener.
-EM: Función "menos es mejor".
% Est.Agreg: Estabilidad de agregados.
Fe: Hierro.
HPC: Hojas por planta edad cosecha.
HPF: Hojas por planta edad floración.
InCS_c: Índice de calidad de suelo obtenido con indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo e indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta.
InCS_{qf}: Índice de calidad obtenido con indicadores químicos y físicos.
InCS_{qtb}: Índice de calidad obtenido con indicadores químicos, físicos y biológicos.
- K: Potasio.
LB: Línea de base inferior.
LT: Umbral inferior.
MDS: Conjunto reducido de indicadores.
MDS_{EO}: Conjunto de indicadores reducido por criterio de expertos y revisión de literatura.
MDS_{PCA}: Conjunto de indicadores reducido por análisis de componentes principales.
Mg: Magnesio.
Mn: Manganeseo.
MPR: Manos por racimo.
N: Nitrógeno.
Na: Sodio.
Nem. Sap: Nematodos saprófitos.
P: Fósforo.
PCA: Análisis de componentes principales.
PO: Función "punto óptimo".
R.similis : *Radopholus similis*.
Ret. PO₄: Retención de PO₄.
RF: Raíz funcional.
RIQ (S): Riqueza, índice de Simpson.
RM: Respiración microbiana.
RSP: Resistencia a la penetración superficial.
RSSP: Resistencia a la penetración subsuperficial.
% Sat. B: Porcentaje de saturación de bases.
SB: Suma de bases.
SIM (E): Similitud.
SMAF: Marco de evaluación del manejo de suelos.
ST. DV: Desviación estándar.
TDS: Conjunto total de indicadores.
UB: Línea de base superior.
UT: Umbral superior.
UT: Umbral superior.
Zn: Zinc.

INTRODUCCIÓN

El banano es una de las frutas más importantes a nivel mundial, tanto por su consumo como por su impacto en el comercio internacional, con más de 12 millones de hectáreas dedicadas a su cultivo globalmente (Martínez-Solórzano & Rey-Brina, 2021; Stoorvogel & Segura, 2018). En Costa Rica, su cultivo, iniciado hace 150 años, se concentra en el Caribe y constituye uno de los principales productos de exportación agrícola, con un promedio de 100 millones de cajas exportadas anualmente (CORBANA, 2022). Sin embargo, la sostenibilidad de la actividad bananera enfrenta diversos desafíos, incluyendo la dependencia en el monocultivo, el uso intensivo de agroquímicos y las consecuencias del cambio climático, como huracanes e inundaciones que afectan las zonas productoras (Martínez-Solórzano & Rey-Brina, 2021; FAO, 2020).

Otro importante desafío es el manejo del suelo, clave para la sostenibilidad, ya que su calidad influye directamente en la productividad agrícola. En este trabajo, la calidad del suelo se define como la capacidad de un suelo determinado para funcionar, dentro de los límites naturales o gestionados del ecosistema, para sostener la productividad de animales y plantas, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y apoyar la salud humana (Karlen et al., 1997). La calidad de suelo está influenciada por propiedades inherentes, producto de la interacción de los factores formadores del suelo, y por propiedades dinámicas, producto del manejo antrópico y actividad biológica que ocurre en el suelo (Bünemann et al., 2018).

Estudios recientes han evaluado los suelos en plantaciones de banano en el Caribe costarricense, donde se presentan variaciones importantes en su fertilidad y calidad, afectadas por factores geológicos y climáticos (Arias et al., 2009a, 2009b). Además, las plagas y enfermedades, como la Sigatoka negra y la marchitez por *Fusarium*, continúan siendo una amenaza significativa para el cultivo, agravada por desequilibrios en la salud del suelo (Noar et al., 2022; Prigigallo et al., 2022).

A nivel mundial, las prácticas agrícolas sostenibles y regenerativas son necesarias para contrarrestar los posibles efectos negativos del cultivo intensivo de banano. Sin embargo, los estudios realizados en otras regiones no siempre son aplicables a las

condiciones de Costa Rica debido a diferencias en suelos y clima (Walker et al., 2022). Por ello, se han llevado a cabo investigaciones locales con el objetivo de clasificar y mejorar la calidad del suelo en plantaciones bananeras de alta y baja productividad (Acuña et al., 2006; Cornwell, 2014), utilizando índices de calidad de suelo (InCS) y comparando diversos indicadores físicos, químicos y biológicos para evaluar su impacto en la sostenibilidad a largo plazo.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad de suelo en dos condiciones de producción de una finca dedicada al cultivo convencional de banano y un bosque secundario maduro, mediante la comparación de variables químicas, físicas y biológicas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar un índice de calidad de suelo en dos condiciones de producción de banano, baja y alta productividad y un bosque secundario maduro, utilizando la herramienta Marco de Evaluación del Manejo del Suelo (SMAF).
2. Desarrollar un índice de calidad de suelo en dos condiciones de producción de banano, baja y alta productividad y un bosque secundario maduro, utilizando el método de Distribución Normal Acumulativa (CND) y la base de datos del mapa de suelos de Costa Rica.
3. Comparar las ventajas y desventajas de las metodologías SMAF y CND utilizadas para obtener los índices de calidad de suelo.

CAPITULO I. PAPEL DE LA CALIDAD DEL SUELO EN EL CULTIVO DE BANANO: RETOS Y OPORTUNIDADES ACTUALES

RESUMEN

El banano es una de las frutas más importantes a nivel mundial, tanto en términos de exportación como de consumo. Ocupa aproximadamente 12 millones de hectáreas en suelos tropicales y subtropicales. En Costa Rica, el cultivo de banano ha sido crucial para su economía desde hace más de 150 años, destacando el monocultivo extensivo como el principal sistema de producción. Actualmente, Costa Rica cultiva banano en 42,512 hectáreas y es uno de los mayores exportadores del mundo. El presente capítulo tiene como objetivo describir la relación entre la calidad del suelo, la productividad y la sostenibilidad, y determinar si existen evidencias de un deterioro de la calidad del suelo en el cultivo del banano en Costa Rica. El trabajo incluye una revisión de las principales investigaciones existentes sobre calidad de suelos bananeros, y las perspectivas a futuro para un mejor abordaje de este tema en el cultivo a nivel nacional. La calidad del suelo es un factor determinante en la sostenibilidad de los cultivos, en general, y específicamente de banano. Estudios recientes han subrayado la importancia de evaluar, mantener y mejorar la calidad del suelo para mantener los rendimientos y asegurar la sostenibilidad del cultivo. En Costa Rica, sin embargo, los estudios sobre la calidad del suelo en este cultivo han sido limitados y no existe una documentación adecuada de la sostenibilidad del cultivo asociada a la calidad del suelo. Por lo tanto, se hace necesario un enfoque más integrado y detallado para evaluar los impactos del monocultivo y las prácticas agrícolas en la calidad del suelo a través del tiempo. La investigación en la calidad del suelo proporciona un enfoque complementario a la clasificación tradicional de aptitud, y debe enfocarse en crear índices, los cuales pueden ser aplicados a regiones con características similares, y también que permitan incluir la diversidad de condiciones en las que se cultiva el banano, proporcionando así herramientas para monitorear y mejorar la gestión del suelo, y asegurar la sostenibilidad del cultivo de banano en el país.

INTRODUCCIÓN

Contexto global y desafíos para la sostenibilidad del cultivo de banano

El banano es una de las frutas más exportadas y consumidas en el mundo, y uno de los motores del comercio a nivel mundial (Martínez-Solórzano & Rey-Brina, 2021). En total se han registrado 12 millones de hectáreas de suelos tropicales y subtropicales del mundo dedicadas a este cultivo, incluyendo diversas variedades (Stoorvogel & Segura, 2018). En los países productores, esta actividad se desarrolla en una amplia variedad de sistemas de producción, desde monocultivo extensivo hasta sistemas de subsistencia (Martínez-Solórzano et al., 2020; Stoorvogel & Segura, 2018). La fruta del banano posee cualidades alimenticias particulares que lo convierten en un alimento con un potencial estratégico en la seguridad alimentaria mundial (Martínez-Solórzano & Rey-Brina, 2021).

La actividad bananera en Costa Rica es una de las más antiguas (Martínez-Solórzano & Rey-Brina, 2021), se inició desde hace ciento cincuenta años, de la mano con la construcción del ferrocarril y se orientó hacia un modelo de monocultivo extensivo (Goluboy & Vega, 1988). Las primeras plantas sembradas en Costa Rica fueron de la variedad Gros Michel, introducidas al país desde Panamá en 1871 (Soto, 1992). Actualmente, el cultivo de banano para exportación, de la variedad del grupo Cavendish, se desarrolla en 42 512 ha (Corporación Bananera Nacional [CORBANA], 2024). El banano es uno de los tres principales productos de exportación agrícola del país (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria [SEPSA], 2022). El registro promedio de exportaciones alcanza 100 millones de cajas de 18 kg de banano, lo que sitúa a Costa Rica entre los principales exportadores de banano del mundo (CORBANA, 2024). La actividad bananera tiene un importante impacto a nivel nacional, pero principalmente sobre el desarrollo económico y social del Caribe costarricense (CORBANA, 2024).

La sostenibilidad de un sistema agrícola hace referencia a su habilidad para mantenerse productivo y eficiente de forma indefinida (Lal, 1998). En el caso de la industria bananera a nivel mundial, la sostenibilidad es uno de los principales desafíos, mientras que otros han sido vinculados al uso intensivo de biocidas y al sistema de monocultivo (Vellema & Jansen, 2018). El cultivo de banano en Costa Rica no es una excepción, este

enfrenta importantes retos para mantener rendimientos rentables y asegurar la sostenibilidad de la actividad al mismo tiempo (Vellema & Jansen, 2018).

Estimaciones mundiales pronostican un incremento en los volúmenes de exportaciones de banano Cavendish hacia los principales mercados, lo que implica un aumento en la producción y su eficiencia (Martínez-Solórzano & Rey-Brina, 2021). En este contexto, el incremento en la eficiencia productiva va a requerir modificaciones y ajustes en las prácticas de manejo del suelo, el principal recurso que sostiene la productividad (Stoorvogel & Segura, 2018). Existe una fuerte relación entre calidad de suelo, productividad y sostenibilidad (Lal, 1998), no obstante, a nivel mundial, la gran diversidad de cultivares, sistemas de producción, condiciones de suelo y clima son un reto para la adopción de prácticas generalizadas para asegurar la sostenibilidad (Staver, 2018).

El cambio climático es otro de los desafíos más significativos. A este proceso de cambio se atribuyen los desastres naturales experimentados en los últimos años en partes de Centroamérica, como huracanes e inundaciones, y las irregularidades en los patrones de precipitación en las principales regiones productoras del mundo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020), que han afectado importantes áreas de producción y ponen en riesgo la sostenibilidad de la actividad (Martínez-Solórzano & Rey-Brina, 2021; Varma & Bebbber, 2019).

Otros desafíos prioritarios son las plagas y enfermedades que afectan el cultivo de banano. Entre ellas, destaca la “Sigatoka negra”, enfermedad foliar causada por el hongo *Pseudocercospora fijiensis* (Noar et al., 2022); la “marchitez por Fusarium”, causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* Raza 4 Tropical (Das et al., 2023) la cual está presente en América Latina en Colombia, Perú y Venezuela; el “moko” o marchitez bacteriana, causada por *Ralstonia solanacearum* (Blomme et al., 2017); y el nemátodo fitoparásito *Radopholus similis* (Torres-Asuaje et al., 2023). Estas plagas y enfermedades afectan órganos cruciales de la planta, como las hojas y las raíces, limitando su desarrollo adecuado y la producción. Además, su incidencia y severidad se han relacionado con desequilibrios en la salud y calidad del suelo (Prigigallo et al., 2022; Segura et al., 2021; Segura et al., 2018).

El presente capítulo tiene como objetivo describir la relación entre la calidad del suelo, la productividad y la sostenibilidad, y determinar si existen evidencias de un deterioro de la calidad del suelo en el cultivo del banano en Costa Rica.

Evolución del concepto de calidad del suelo y su relación con la productividad

En este trabajo, la calidad del suelo se define como la capacidad de un suelo determinado para funcionar, dentro de los límites naturales o gestionados del ecosistema, para sostener la productividad de animales y plantas, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y apoyar la salud humana (Karlen et al., 1997). Naturalmente, todos los suelos tienen la habilidad de funcionar, sin embargo, unos funcionan mejor que otros para ciertos usos (Lal, 1998). Actualmente, la definición de la calidad del suelo abarca las propiedades inherentes, definidas por los factores formadores del suelo, y su naturaleza dinámica, influenciada por los procesos biológicos y el manejo antrópico (Bünemann et al., 2018).

El concepto calidad de suelo no es nuevo, y ha experimentado una serie de cambios, desde su concepción como la aptitud del suelo para el crecimiento de las plantas, tal como lo han revelado algunos registros de las dinastías Xia y Zhou (2070-256 AC), los pensadores romanos, Varro, Catón y Columella (Karlen et al., 2019), y la cultura precolombina Cabécar en Costa Rica (Sandoval, 2023). Catón, por ejemplo, subrayaba la importancia de escoger suelos fértiles; Varrón relacionaba la calidad del suelo con su valor; y Virgilio veía el descanso del suelo como una inversión a largo plazo (Doran et al., 2015).

A partir de estos registros, el concepto se enriqueció con una serie de trabajos, llevados a cabo entre 1910 y 1940, que subrayaron la importancia de la adición de materia orgánica para mejorar la estructura del suelo y evitar pérdidas de suelo por erosión (Karlen et al., 2019). Mas tarde, en 1970, al haberse experimentado una alta dependencia al desarrollo de equipos de mecanización y fertilizantes sintéticos, la concepción de la calidad del suelo mantuvo una visión utilitaria del suelo. Para ese entonces, un suelo de calidad fue descrito como aquel capaz de producir maíz, soja y trigo en condiciones de manejo de alto nivel, con un claro enfoque hacia la productividad (Karlen et al., 2019).

Es a partir de 1990 que incrementa la conciencia en que la evaluación del suelo debe basarse en múltiples funciones, más que en la productividad (Bünemann et al., 2018). Esta época dio paso a muchos de los esquemas de evaluación de la calidad del suelo, en Canadá y Nueva Zelanda en el año 1996, en Australia en el año 1999 y en Alemania en el año 2000 (Karlen et al., 2019), conduciendo a un aumento exponencial en los trabajos realizados por la comunidad científica para evaluar la calidad del suelo (Janzen et al., 2021). Este contexto provocó uno de los mayores cambios en el concepto, integrando la visión de suelo no solo como un medio para el crecimiento y producción de plantas, sino como un ecosistema que sustenta diversas funciones y servicios (Jat et al., 2023; Karlen et al., 2019; Rinot et al., 2019).

Actualmente, el concepto de la calidad del suelo ha sido objeto de debate en la comunidad científica (Janzen et al., 2021). Algunos autores consideran innecesario su conceptualización, argumentando que es redundante con la capacidad de identificar y encontrar un suelo apto para una determinada función (Karlen et al., 1997). Este punto de vista coincide con el conocimiento tradicional de los pueblos originarios de Costa Rica, como la comunidad Cabécar que identifica condiciones de suelo adecuadas para el cultivo de banano sin recurrir a metodologías formales de evaluación (Sandoval, 2023). Por otro lado, se ha argumentado que la evaluación de la calidad de suelo es impracticable debido a la gran variación natural entre los diferentes órdenes de suelo (Karlen et al., 1997).

A pesar de que algunos autores han desestimado la relación entre calidad del suelo y productividad (Larson & Pierce, 1991), el suelo es el ecosistema que sostiene la producción agrícola, por lo tanto, mantener su calidad es fundamental para asegurar la sostenibilidad de la producción (Marion et al., 2022). La productividad y sostenibilidad están implícitas en el estudio de la calidad de suelo (Doran & Parkin, 1994). El aumento de la calidad ha sido asociado con el incremento de los rendimientos de los cultivos (Biswas et al., 2023; Juhos et al., 2016), y se logra mediante la atención y mejora de factores más limitantes (Chaparro et al., 2012; Miner et al., 2020).

La productividad (biomasa o rendimiento producido) corresponde a la dimensión biofísica a través de la que se cuantifica la sostenibilidad (Lal, 1998). El rendimiento de las plantaciones bananeras varía de acuerdo con el manejo. Plantaciones con un manejo intensivo pueden alcanzar rendimientos superiores a las 3000 cajas $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (cajas de

18.14 kg de fruta), como en el caso de Filipinas y Costa Rica, mientras que otros sistemas menos intensivos, como en algunos países del continente africano, alcanzan rendimientos cercanos a las 300 cajas ha⁻¹ año⁻¹ (Stoorvogel & Segura, 2018). En ambos extremos, aún existe la interrogante sobre la sostenibilidad de estos sistemas productivos. Sin embargo, la literatura, aunque realizada fuera de Costa Rica, ha relacionado altos índices de calidad con mejores indicadores biométricos del cultivo y altos rendimientos (Culma et al., 2017; Delgado et al., 2010; González García et al., 2021; Olivares et al., 2022; Villarreal-Núñez et al., 2013).

Deterioro de la calidad en suelos cultivados con banano en Costa Rica

Desde sus inicios, la actividad bananera en Costa Rica se orientó hacia un modelo intensivo (Goluboay & Vega, 1988; Soto, 1992). El área cultivada en el país se incrementó aceleradamente durante la década de 1980 (Jadin et al., 2016), principalmente por el establecimiento de plantaciones de banano para satisfacer la demanda creciente en los principales mercados (Gauggel, et al., 2005). En el inicio del establecimiento de plantaciones en Costa Rica, con la variedad Gros Michel, se desarrolló en suelos de bosques tropicales, mientras que las expansiones entre las décadas de 1980 y 1990 fue llevada a cabo en parte en suelos de bosques, en suelos en producción de cacao, plátano, arroz y suelos en ganadería, entre otros cultivos (Gibbs et al., 2010). Algunos autores señalan que, a medida que se llevó a cabo esta conversión, se inició la degradación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Guimarães et al., 2014; Ledo et al., 2020).

El incremento del área cultivada en Costa Rica alcanzó un pico en el año 1994 con más de 52 mil hectáreas, para luego disminuir de manera gradual hasta el año 2002, donde alcanzó un poco más de 40 mil hectáreas (Serrano, 2005). Desde entonces, y debido a la legislación para el cambio de uso de suelo (Ministerio de Ambiente y Energía [MINAE], 2003) el país ha mantenido cierta estabilidad en las hectáreas en producción de banano. A partir de 1990, los rendimientos se redujeron hasta alcanzar el menor valor en 1994, para continuar con un comportamiento inestable hasta el año 2015, donde los rendimientos se comenzaron a elevar hasta el año 2022 (Figura 1.1). Zuñiga et al. (2009) destacan que después de algunos años de producción intensiva, algunas plantaciones bananeras de productores independientes en Costa Rica comenzaron a experimentar una reducción de los rendimientos, atribuida al deterioro de la calidad del suelo. Otros registros nacionales

indican que, a pesar de contar con claros estándares para la selección de suelos para el cultivo (Jaramillo & Vásquez, 1990), la reducción de la productividad experimentada en el corto plazo se debía a que una gran mayoría de plantaciones se establecieron con estudios de suelo inadecuados (Gauggel, et al., 2005), lo cual influyó en el abandono de muchas áreas productoras entre 1980 y 1990, más el abandono de las áreas bananeras localizadas en el Pacífico de Costa Rica por razones laborales y de costos de producción.

Algunos autores han señalado que la disminución en la productividad en algunos países de Latinoamérica se debe a un deterioro de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Gauggel, et al., 2005; Delgado et al., 2010). Países como Panamá Venezuela y Costa Rica han mostrado oscilaciones importantes a partir de 2010, asociadas a un agotamiento de los suelos (Delgado et al., 2010; Rosales et al., 2008). Por el contrario, otros países donde predominan sistemas de producción orgánica, como Venezuela y República Dominicana, ha mantenido cierta estabilidad en la productividad (Delgado et al., 2010).

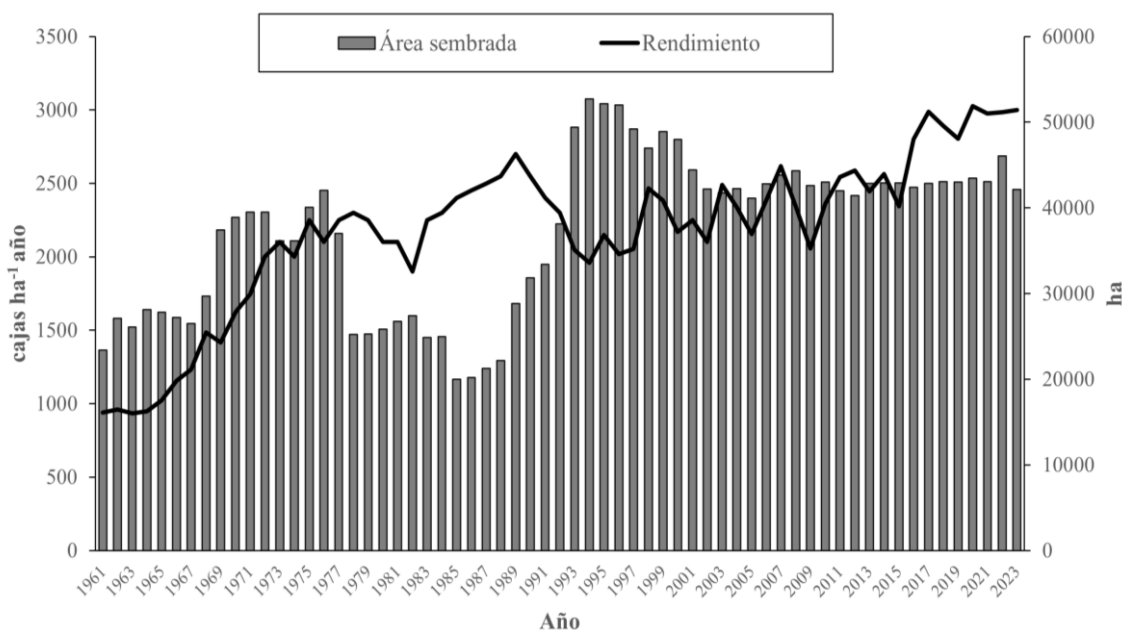


Figura 1.1. Histórico de rendimiento del cultivo de banano (cajas de 18.14 kg ha⁻¹ año) y área sembrada (ha) en Costa Rica de 1961 a 2023 (CORBANA, 2024; FAO, 2020; Serano, 2005; SEPSA, 2022).

Por otra parte, para asegurar la rentabilidad necesaria de la actividad, el manejo de los agroecosistemas bananeros implica el uso intensivo de insumos, con el fin de proporcionar los nutrientes necesarios y controlar plagas y enfermedades (Geissen et al.,

2010; Melgar et al., 2008). Este manejo se ha asociado a un desequilibrio ecológico del suelo en las plantaciones de banano (Cornwell, 2014). Sin embargo, la base científica sobre los principales impactos del cultivo de banano y su manejo agrícola en la calidad de los suelos es limitada, lo cual no permite ver la magnitud de ese impacto, y medir si el mismo puede ser mitigado o corregido, con prácticas de agricultura regenerativa.

Estudios de la calidad de suelo en el cultivo banano

Recientes investigaciones sobre la calidad del suelo en sistemas de producción de banano se han llevado a cabo en China (Zhong et al., 2014, 2021), Australia (Pattison et al., 2005; Pattison et al., 2008; Rasiyah et al., 2009), África (Mulat et al., 2021; Recha et al., 2022), e Irán (Samaei et al., 2022). En América destacan estudios en Venezuela (Delgado, Trejos, et al., 2010; González García et al., 2021; Olivares et al., 2022; Rey et al., 2009), Colombia (Afanador-Barajas et al., 2020; Culma et al., 2017; Vallejo Quintero et al., 2020), Panamá (Villarreal-Núñez et al., 2013), y Brasil (Silva et al., 2022). Estos trabajos proporcionan una referencia importante y una base para seleccionar los indicadores a utilizar en este cultivo. Sin embargo, debido a factores como el clon o cultivar utilizado, las condiciones climáticas y los tipos de suelo estudiados, sus resultados e índices podrían no ser extrapolables a las condiciones de cultivo de Costa Rica.

En los sistemas de producción de banano en Costa Rica, se realiza un monitoreo sistematizado de la fertilidad química del suelo, el estado nutricional y el sistema radical de la planta. En las fincas de pequeña escala y productores independientes se realiza con apoyo de CORBANA o el Ministerio de Agricultura, y en las grandes compañías por sus propios departamentos técnicos. Sin embargo, parámetros biológicos se evalúan únicamente con fines de investigación, y el monitoreo de la fertilidad física del suelo es esporádico y solo se considera en estudios específicos de aptitud (Jaramillo & Vásquez, 1990), el estudio mineralógico o clasificación del suelo con fines de investigación (Alvarado et al., 2014b, 2014a; Arias et al., 2009c, 2009b, 2009a; Buurman et al., 2007; Nieuwenhuys et al., 2000). Aunque los datos no están disponibles públicamente y son generados con otros objetivos, son valiosos para la adopción de herramientas de evaluación de la calidad del suelo en sistemas de producción de banano.

En lo que respecta a estudios de calidad de suelo en Costa Rica, la mayoría disponible coincide con un periodo de crecimiento exponencial en los estudios sobre este tema

(Janzen et al., 2021). Londoño (2006), estudió la estructura de la comunidad de nematodos de vida libre como indicador de la calidad del suelo en plantaciones comerciales de banano. Cerda et al. (2008) compararon la calidad del suelo en sistemas agroforestales de banano-laurel y plátano. Peña y Acuña (2008), estudiaron el estado de indicadores biológicos, químicos y físicos del suelo en seis fincas comerciales de banano. Finalmente, Delgado et al. (2010) evaluaron la calidad del suelo en sistemas de producción de banano de Costa Rica y otros países de América Latina. Cornwell (2014) comparó la calidad del suelo de cuatro agroecosistemas, incluido el cultivo de banano. Sin embargo, estos estudios, realizados hace más de diez años, no dan la relevancia que ameritan los indicadores biológicos (Kibblewhite et al., 2008), y no explican de manera integral los principales impactos del monocultivo de banano y su manejo en la calidad del suelo.

En general, los estudios disponibles sobre la calidad de los suelos bananeros han construido índices utilizando un conjunto mínimo de indicadores (MDS por sus siglas en inglés), obtenidos a través de un análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés) ya que elimina la subjetividad en la selección de los indicadores y retiene los que explican la mayor variación presente (Mukherjee & Lal, 2014). En las investigaciones disponibles, el MDS ha estado conformado por los siguientes indicadores: textura, densidad aparente, resistencia a la penetración, pH, cationes de intercambio (Ca, Mg, K), capacidad de intercambio catiónico (CIC), acidez intercambiable, carbono orgánico total, respiración microbiana, carbono de la biomasa microbiana, actividad enzimática y nematodos de vida libre (Afanador-Barajas et al., 2020; Cornwell, 2014; Culma et al., 2017; Delgado, Rosales, et al., 2010; Mulat et al., 2021; Olivares et al., 2022; Pattison et al., 2008; Rasiah et al., 2009; Rey et al., 2009; Samaei et al., 2022; Silva et al., 2022; Villarreal-Núñez et al., 2013).

Evaluación de la calidad de suelo

A partir de 1930 se han recopilado evidencias de la degradación del suelo en sistemas agrícolas, debido al manejo y labranza intensiva y fertilización en exceso. Lo anterior impulsó el estudio de parámetros físicos y químicos, así como la creación de organizaciones y programas para velar por la calidad del suelo (Karlen et al., 2019). Alrededor del año 2000 surge una cantidad importante de metodologías formales para evaluar la calidad del suelo que perduran hasta el día de hoy (Karlen et al., 1997). Existen metodologías específicas para suelos agrícolas, naturales y contaminados, así mismo, puede

realizarse en distintos niveles, desde los procesos básicos del suelo en laboratorio, hasta parcelas, fincas, y a escala nacional, regional e internacional (Bastida et al., 2008). A pesar de la disponibilidad de metodologías formales, en general se ha evidenciado una falta de estandarización en los trabajos de investigación sobre la calidad del suelo, que responde a la falta de consenso en la comunidad científica (Sarmiento Reyes et al., 2018).

Debido a la diversidad en el uso de los suelos, este trabajo comparte la visión de Karlen et al. (1997), quienes destacaron que la evaluación de la calidad del suelo debe ser relativa y no absoluta. En el contexto de este estudio, basta con observar las diferencias en las características de los suelos bananeros de Costa Rica (Arias et al., 2009b, 2009a), para inferir que, a pesar de cumplir con la función común de producir banano, la calidad de cada suelo es diferente.

Idealmente la evaluación de la calidad del suelo debe contemplar sus propiedades inherentes, su contexto y su función (Karlen et al., 1997). La calidad es entonces el resultado de la contribución de parámetros químicos, físicos y biológicos (Larson & Pierce, 1991) (Figura 1.2), por lo que la evaluación requiere inicialmente un procedimiento de muestreo que debe considerar la variación temporal y espacial de esos parámetros en el área de estudio (Lal, 1998). Los parámetros o indicadores son sensibles a cambios, deben ser interpretables (Rinot et al., 2019), cuantificables, y están asociadas a procesos físicos, químicos o biológicos del suelo (Pattison et al., 2008). Su interpretación depende de la metodología de investigación, los valores óptimos establecidos para el cultivo y los servicios ecosistémicos del suelo (Bünemann et al., 2018; González García et al., 2021; Villarreal-Núñez et al., 2013).

Las variaciones registradas en estos indicadores informan sobre la calidad del suelo en el presente y permiten dar un seguimiento a lo largo del tiempo, mejorando las prácticas de manejo del sistema productivo (Bünemann et al., 2018., Seybold et al., 2018). La elección de indicadores debe ser, por lo tanto, cuidadosa y justificada, considerando que los indicadores son específicos para las condiciones particulares evaluadas y los servicios ecosistémicos brindados (Afanador-Barajas et al., 2020). Además, Pattison et al., (2008) resaltan que los indicadores seleccionados para monitorear la calidad del suelo deben compararse con sitios similares, donde la alteración del suelo sea mínima o inexistente.

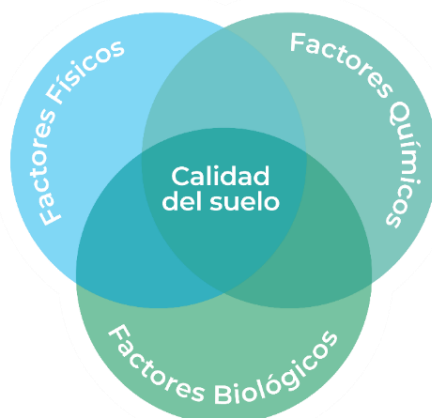


Figura 1.2. Esquema interacción de factores químicos, físicos y biológicos que definen la calidad del suelo. Nota: diseñado por Rolando Hidalgo.

Aunque el enfoque reduccionista ha sido objeto de debate (Thoumazeau et al., 2019), es común y aceptado en las investigaciones emplear métodos estadísticos para seleccionar el conjunto mínimo de indicadores (MDS) (Cherubin et al., 2016; Marion et al., 2022), y a partir del cual se construye un índice multiparamétrico (Bastida et al., 2008). Como el MDS incluye parámetros de distinta naturaleza, se utilizan funciones no lineales para eliminar su dimensión e integrarlos en un índice, asignando puntajes que van de 0 a 1 (Andrews et al., 2004).

En el presente trabajo, la asignación del puntaje se realizó a través de dos metodologías. La primera corresponde al Marco de Evaluación del Manejo del Suelo (SMAF por sus siglas en inglés), ampliamente utilizada para obtener índices de calidad de suelo (Andrews et al., 2004., Cherubin et al., 2016., da Luz et al., 2019., Lima et al., 2013., Marion et al., 2022). Esta metodología fue creada para evidenciar si la calidad del suelo empeora, se mantiene, o mejora debido al uso actual del suelo y las prácticas de manejo, y propicia el uso de indicadores sensibles de diferente naturaleza (Karlen et al., 2019). SMAF emplea umbrales altos o bajos del conjunto de datos obtenidos y niveles óptimos para cada indicador, de acuerdo con el cultivo que se está estudiando (Andrews et al., 2004., Cherubin et al., 2016., Marion et al., 2022).

Otra metodología, derivada de SMAF (Andrews et al., 2004) y desarrollada por Moebius-Clune et al., (2016), es la Distribución Normal Acumulativa (CND por sus siglas en inglés). Esta metodología utiliza un conjunto de datos mayor para obtener la

media, la desviación estándar y la función de la distribución normal acumulativa para asignar el puntaje de cada indicador (Moebius-Clune et al., 2016). Tanto SMAF como CND fueron validadas recientemente por van Es y Karlen (2019), quienes concluyeron que ambas metodologías son sensibles para detectar cambios en la calidad del suelo. El presente estudio hace referencia a la metodología CND para interpretar indicadores y obtener índices de calidad de suelo en el cultivo de banano en Costa Rica por primera vez.

Perspectivas del estudio de la calidad del suelo en el cultivo de banano en Costa Rica

Una investigación bibliográfica sobre el estudio de la calidad de los suelos bananeros de Costa Rica evidencia un gran potencial. Este potencial abarca desde estandarizar las metodologías de muestreo y análisis de laboratorio de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, hasta el uso de herramientas estadísticas para interpretar los indicadores, obtener un conjunto mínimo de datos y desarrollar índices. También se incluye la utilización de kits (Thoumazeau et al., 2019) o sensores *in situ* que generen información en tiempo real y permitan mapear la condición y el cambio en la calidad y salud del suelo (Rinot et al., 2019). Un aspecto clave para la investigación es el desarrollo de un índice que abarque la gran diversidad de suelos y condiciones climáticas en los que se cultiva el banano en Costa Rica (Arias et al., 2009c, 2009b, 2009a). Otro aspecto crucial es la integración de mayor cantidad de indicadores biológicos para entender su aporte en la disponibilidad de nutrientes, la protección contra plagas y enfermedades, la resistencia al estrés, y su interacción con otros indicadores (Karlen et al., 2019; Thoumazeau et al., 2019).

En Costa Rica, una alta proporción de los suelos dedicados al cultivo se han seleccionado utilizando el sistema de clasificación de la aptitud de tierras para el cultivo de banano, desarrollado por Jaramillo y Vásquez (1990). Este sistema, con un enfoque utilitario, clasifica a los suelos en cinco clases de aptitud (desde la clase I a la V), diferenciadas por su textura, acidez, profundidad efectiva, estructura, tabla de agua y topografía. La clase I corresponde a la de mayor aptitud y potencial productivo, mientras que las clases IV y V de menor aptitud se excluyen para la siembra de banano (Jaramillo & Vásquez, 1990).

No obstante, existen pocos estudios publicados respecto a la sostenibilidad productiva de cada una de estas clases de suelo y, aún menos, sobre cómo las características físicas, químicas y biológicas del suelo varían con el manejo del cultivo. Por lo tanto, estudiar la

calidad del suelo y desarrollar índices de calidad proporcionaría un complemento al sistema de clasificación tradicional, permitiendo incluir un conjunto mínimo de indicadores, con mayor participación de indicadores biológicos, en la determinación de la calidad del suelo en los sistemas bananeros, lo que debe generar un manejo más sostenible del cultivo.

CONCLUSIONES

La calidad del suelo es fundamental para la productividad agrícola, ya que un suelo de alta calidad puede sustentar un crecimiento óptimo de plantas y animales, mejorar la calidad del agua y del aire, y apoyar la salud humana. Aunque algunos autores cuestionan su relevancia, la literatura muestra que un buen manejo del suelo incrementa los rendimientos y la sostenibilidad de los cultivos.

Los estudios recientes sobre la calidad del suelo en el cultivo de banano, realizados principalmente fuera de Costa Rica, han aportado indicadores valiosos, pero no directamente aplicables a las condiciones locales. En Costa Rica, aunque existen investigaciones previas, estas no han abordado integralmente los impactos del manejo tradicional del monocultivo de banano en la calidad del suelo. Hay evidencia de que en suelos de clases I y II según la aptitud en el sistema de clasificación de tierras utilizado en Costa Rica, que tiene una base muy fuerte en los aspectos de física de suelos, se obtienen mejores rendimientos y más sostenibles, que en suelos de clases III y IV. No obstante, un suelo de clase III, con un manejo adecuado pueden alcanzar productividades sostenibles en el tiempo.

Las perspectivas sobre la realización de estudios de la calidad del suelo en el cultivo de banano en Costa Rica son prometedoras, con un amplio potencial para la estandarización de metodologías y el uso de tecnologías avanzadas. Así como contribuir con el desarrollo de un índice general de calidad de suelo, que incluya la diversidad de suelos existentes, y una mayor cantidad de indicadores biológicos, lo cual es esencial para comprender y mejorar la sostenibilidad de los suelos bananeros. Estos avances proporcionarán herramientas clave para la gestión y optimización del cultivo de banano, complementando y mejorando el sistema de clasificación de la aptitud de tierras existente. La sostenibilidad del cultivo de banano enfrenta diversos desafíos significativos a nivel global. Entre estos

se destacan el uso intensivo de biocidas en un entorno donde cada vez hay más presiones regulatorias, la dependencia del monocultivo, la amenaza de enfermedades como la marchitez por *Fusarium* R4T, y el cambio climático. Abordar estos retos requerirá la adopción de prácticas agrícolas sostenibles y eficientes, apoyadas en estudios sobre la calidad del suelo que reduzcan el impacto ambiental y garanticen la sostenibilidad de esta importante industria.

CAPÍTULO II. GÉNESIS Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS BANANEROS DE ALTA Y BAJA PRODUCTIVIDAD Y UN SUELO DE BOSQUE EN EL CARIBE DE COSTA RICA

RESUMEN

Los suelos clasificados se ubican en la finca Tortuguero, Limón, cantón Pococí, distrito Cariari, dedicada a la producción de banano para exportación. Los suelos se encuentran en la cuenca del Río Tortuguero, originada en el Cuaternario, a partir de deposiciones aluviales y coluviales mixtas provenientes de las cordilleras de Guanacaste y Central. Los suelos descritos se ubican en elevaciones que van de 0 a 30 msnm, bajo un rango de precipitación media anual entre 5.000 y 6.000 mm, y en la zona de vida de bosque muy húmedo tropical (bmh-T). Dos suelos corresponden a condiciones de producción de banano, una de alta productividad (AP) y otra de baja productividad (BP), sembradas en 1992 con el clon Valery, grupo Cavendish (*Musa* AAA). El tercer suelo corresponde a un suelo de un bosque secundario maduro sin intervención desde hace más de 30 años (BM). En BP el suelo fue clasificado como *Dystric Fluventic Eutrudepts*, mientras que en AP y BM fueron clasificados como *Andic Dystrudepts*. Los tres sitios compartieron características de clasificación a nivel de orden y suborden. Sin embargo, algunas diferencias como mayor fertilidad química, mayor compactación, limitaciones de drenaje en BP, mayores contenidos de carbono orgánico total y menor densidad aparente en AP y en BM, los segregaron a nivel de gran grupo y subgrupo.

INTRODUCCIÓN

La caracterización de los suelos en el Caribe costarricense, especialmente en plantaciones bananeras, se inició en el siglo XX. Estudios posteriores, realizados entre 1977 y 1992 como parte del programa de fomento bananero han ampliado el conocimiento de los suelos en los que se desarrolla la actividad bananera nacional (Arias et al., 2009a). Investigaciones más recientes han clasificado taxonómicamente los suelos bananeros de la región y los han caracterizado desde una perspectiva química y mineralógica (Alvarado et al., 2014b, 2014a; Arias et al., 2009c, 2009b, 2009a; Buurman et al., 2007; Nieuwenhuys et al., 2000). Estos estudios son fundamentales para la evaluación de la calidad del

suelo, la cual está determinada por las propiedades intrínsecas del mismo (Bünemann et al., 2018).

En la zona de estudio, se han descrito geomorfológicamente llanuras aluviales del Holoceno y planicies aluviales del Pleistoceno, que comprenden once cuencas hidrográficas donde se localizan las principales zonas productoras de banano de Costa Rica (Arias et al., 2009a). Utilizando el Río Reventazón como referencia geográfica, el Caribe se ha dividido en dos regiones geológicas con diferencias importantes en la fertilidad de los suelos. Los suelos del noroeste, de baja fertilidad y bajo pH, contrastan con los del sureste, que son de alta fertilidad (Arias et al., 2009a, 2009c).

Los suelos del noroeste, con una antigüedad entre 2200 y 3370 años, están influenciados por el vulcanismo activo de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica (Arias et al., 2009a). Factores como la alta pluviosidad y temperatura, inundaciones periódicas y tectonismo activo contribuyen a la desestabilización y transporte de material desde las partes altas a las llanuras del Caribe (Arias et al., 2009b).

En Costa Rica, los Inceptisoles se distribuyen en todo el país y abarcan un 14,86% del territorio nacional (Cubero, 2015). En la región noroeste del Caribe predominan los Inceptisoles con propiedades ándicas y dístricos, apreciados para cultivos de exportación (Alvarado, 2022). Estos suelos, caracterizados por un relieve mayoritariamente plano, presentan una fertilidad que varía de baja a media (Arias et al., 2009b).

El presente trabajo tuvo como objetivo clasificar taxonómicamente dos suelos bajo cultivo de banano y un suelo en un bosque secundario maduro en Tortuguero, Pococí, Limón. Además, este trabajo describió las particularidades de la zona de estudio y los factores y procesos formadores que influyen la calidad del suelo.

Factores formadores

Material parental y mineralogía

Los sitios estudiados en este trabajo se encuentran en la llanura aluvial ubicada al Noroeste del Caribe de Costa Rica, una prolongación de la gran fosa tectónica del lago de Nicaragua (Battistini & Bergoeing, 1984). Esta zona se originó en el Cuaternario, a partir de deposiciones aluviales y coluviales mixtas (Arias et al., 2009a; Castillo, 1993; Jiménez 1972) que provienen de las cordilleras de Guanacaste y Central (Battistini & Bergoeing, 1984). Su origen está influenciado también por coladas de lava, lahares, rocas

piroclásticas, ignimbritas, rocas andesíticas, basaltos y cenizas volcánicas del cuaternario (Dóndoli et al., 1968).

Los procesos formadores del suelo de mayor influencia son el enriquecimiento y la acumulación de materiales (Buol et al., 2011), principalmente influenciados por las inundaciones en la cuenca del río Tortuguero. Por otra parte, Bergoeing (2008), describe el litoral Norte del Caribe como una serie de cordones litorales flandenses, cubiertos por densa vegetación ripícola tropical y canales navegables. Estas características evidencian que la zona estuvo cubierta por el océano hace 6000 años, debido a la influencia de la transgresión flandense (transgresión del holoceno), desde la cual ha emergido progresivamente debido a actividad tectónica positiva y reciente (Bergoeing, 2008).

Con respecto a la mineralogía, Arias et al. (2009a) señalan que los suelos de la zona de este estudio pertenecen a la familia metahalosítica-gibbsítica ($CIC = 10-35 \text{ cmol}(+) \text{ L}^{-1}$), por otro lado, Arias et al., (2009b) señalan predominancia de metahalosita, trazas de materiales de bajo grado de cristalización, gibbsita y montmorillonita, lo que hace que estos suelos tengan una fertilidad baja a moderada, con una suma de bases entre 3,9 a 18,2 $\text{cmol}(+) \text{ L}^{-1}$. Por lo tanto, estos suelos responden bien a la fertilización con Ca, Mg y K (Arias et al., 2009b). Alvarado et al. (2014b) señalan la influencia de arcillas vermiculita y montmorillonita para esta zona, mientras que Alvarado et al. (2014a) resaltan la influencia de mineralogía oxídico caolinítico y vidrio alofano halloysítico, estos últimos generan una gran capacidad para fijar fósforo de estos suelos, entre 31 y 99 % (Arias et al., 2009b). Por otro lado, los contenidos de carbono orgánico en esta zona son altos, en comparación con otros suelos del Caribe, contribuyendo a la CIC del suelo (Arias et al., 2009b).

Clima

La zona del estudio se ubica en un rango de precipitación media anual desde los 5000 a 6000 mm (McClern et al., 2016; Rojas, 2011), y una temperatura promedio anual de 26 °C con un rango entre 21 y 32 °C. Esta zona tiene una estación lluviosa a lo largo de casi todo el año (Rojas, 2011), con una disminución de precipitaciones en los meses de febrero, marzo, setiembre y octubre. No tiene una estación seca definida, en promedio 263 días con lluvia al año (Rojas, 2011).

Cobertura vegetal

Los tres sitios se ubican en la zona de vida que corresponde a bosque muy húmedo tropical (bmh-T) (Holdridge, 1987, Rojas, 2011). Esta zona de vida tiene influencia del clima lluvioso del Atlántico, una característica favorable para la mayoría de los cultivos permanentes y actividades forestales, sin embargo, podría presentar algunas limitaciones, producto del exceso de precipitación durante todo el año, que genera susceptibilidad a la erosión y limitaciones de drenaje (Rojas, 2011). La cobertura vegetal en las dos condiciones de producción de banano (AP y BP) corresponde a *Musa* (Grupo AAA) 'Valery', establecidas en 1992. El sitio BM es un bosque secundario maduro sin intervención desde hace más de 30 años, y las especies de árboles predominantes son *Terminalia amazonia*, *Pentaclethra macrolobia*, *Casearia* sp., y *Hieronima alchorneoides*, de acuerdo con un inventario realizado por el departamento de Operaciones Forestales de Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte S.A (CDDADM).

Relieve, hidrografía y drenaje

La topografía de la cuenca del río Tortuguero es muy plana, las elevaciones se encuentran entre 60 y 120 m.s.n.m, ocupa posiciones de piedemonte y de relieve ligeramente colinado (Rojas, 2011). No obstante, esta llanura posee algunos relieves aislados, producto de surgimientos volcánicos cuaternarios, por ejemplo, el cono estrombólico del Tortuguero, que influyó la construcción flandriana (Battistini & Bergoeing, 1984), y cerros Coronel, Cocorí, Negro, Lomas de Sierpe y Lomas Azules (Rojas, 2011).

Naturalmente, la cuenca es drenada por el río Tortuguero y sus afluentes, los ríos Guápiles y Agua Fría, y los ríos Sierpe, Chiquero, Suerte y Penitencia. El curso de agua sigue la dirección suroeste a noreste, hasta desembocar en el mar Caribe (Rojas, 2011). La frecuencia de inundación para esta zona se clasifica como ocasional, entre 5 y 50 veces en 100 años (Schoeneberger et al., 2012). Los ríos Suerte y Palacios son los de mayor influencia en eventos de inundación en estas plantaciones (Rojas, 2011), no obstante, se han construido estructuras de dique para evitar eventos de inundaciones.

Las condiciones de producción AP y BP están drenadas artificialmente, de acuerdo con observaciones realizadas en campo, el espaciamiento entre canales terciarios en AP es de 22 a 25 m mientras que en BP es de 20 m. En ambas áreas se han realizado gavetas de drenaje superficial para drenar micro relieves que favorecen la acumulación

de agua. El mapa de isobatas de las dos condiciones de producción del año 2019 describe la profundidad del nivel freático 24 h después de un evento de lluvia. Se observó que el nivel freático en BP se ubica a menos de 90 cm, la cual es una condición crítica para el cultivo (Jaramillo & Vázquez, 1990). Además, tres días antes de la descripción de la fosa o calicata en este sitio, la precipitación acumulada que registró la estación meteorológica de la finca fue aproximadamente de 80 mm de lluvia. Durante la descripción en la fosa, el nivel freático se encontraba entre 1 y 1,5 m de profundidad, y se identificaron características redoximórficas entre 0,45 y hasta una profundidad 1,50 m, lo que sugiere que en este perfil ocurre oxidación y reducción de hierro y manganeso. El bajo vigor de la condición de producción de BP es otro indicador de las limitaciones de drenaje en este sitio. En los suelos de Bosque y AP el nivel freático se ubica a más de 1,20 m, condición apropiada para el cultivo (Jaramillo & Vázquez, 1990). Con esta información, el drenaje del suelo en AP y BM clasifica como bien drenado, mientras que el drenaje en BP clasifica como pobremente drenado (Soil Survey Staff, 2018; Schoeneberger et al., 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y zona de estudio

Los suelos estudiados se ubican en finca Tortuguero, Cariari, Pococí, Limón (Figura 2.1). La finca corresponde a un sistema de producción de banano para exportación, propiedad de Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte S.A (CDDADM). La condición de producción de banano de alta productividad (AP) (10.505976 N; 83.621649 O) presentó un promedio histórico de 2433 cajas ha⁻¹ año⁻¹ (min 2178 - max 2916 cajas) en los últimos seis años. La condición de producción de baja productividad (BP) (10.486588 N; 83.636526 O) presentó un promedio de 2144 cajas ha⁻¹ año⁻¹ (min 1966 - max 2296 cajas). Ambas condiciones fueron sembradas en 1992 con *Musa* (Grupo AAA) 'Valery'. El tercer sitio corresponde a un bosque secundario maduro (BM) (Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico [SINIGIR], 2023), con más de 30 años sin intervención (10.498764 N; 83.632668 O), propiedad de CDDADM.

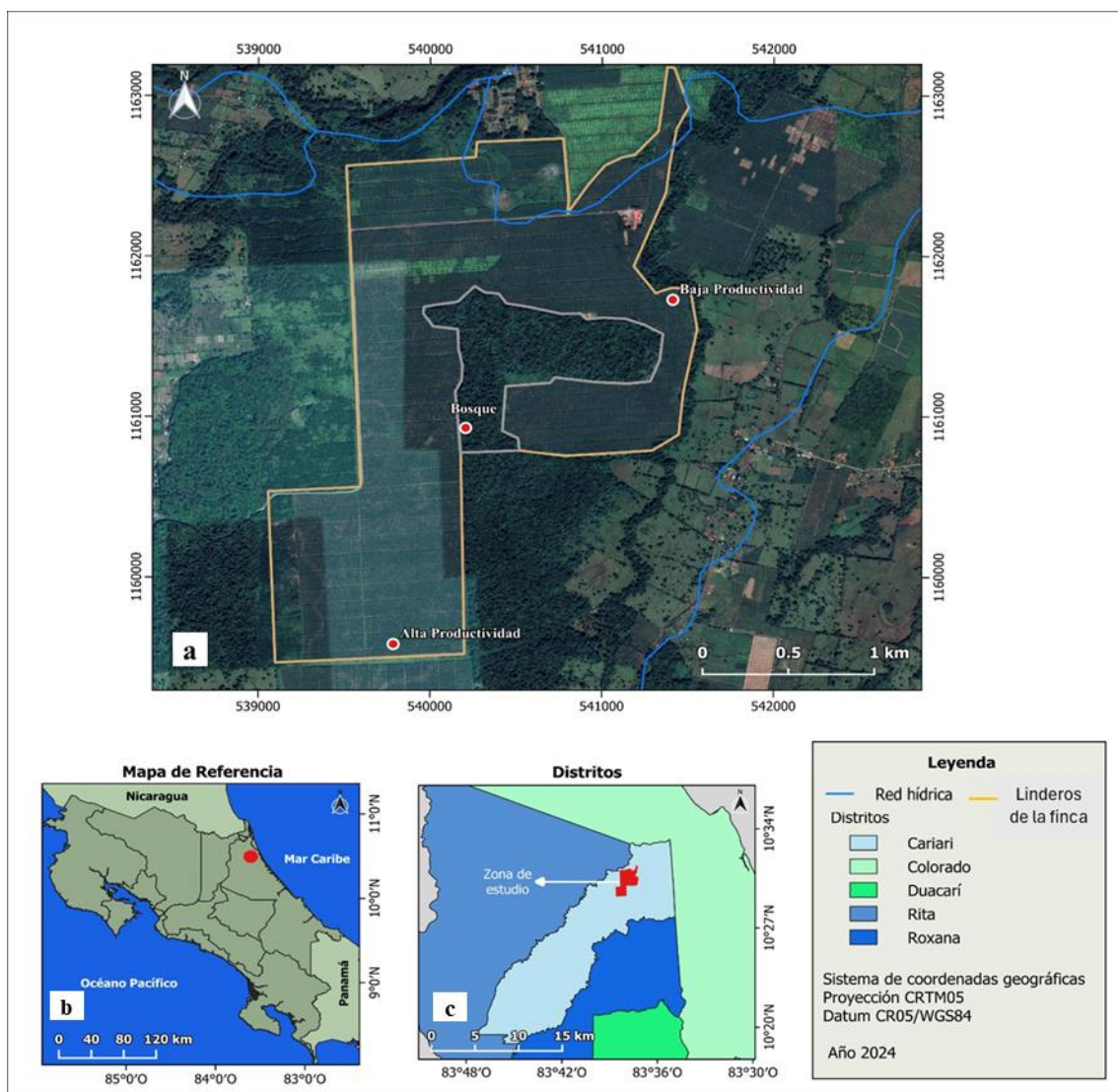


Figura 2.1 a. Ubicación específica de cada una de las áreas estudiadas en finca Tortuguero, bosque secundario maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP). b. Localización de finca Tortuguero en la provincia de Limón. c. Ubicación de finca Tortuguero en el distrito de Cariari.

Fosas de observación

En cada sitio se realizó un transecto con barrenadas (una por hectárea), para definir el pedón modal. Una vez seleccionado el pedón modal en cada sitio, se realizó la fosa o calicata de observación, con dimensiones 2m x 2m x 2m. En cada fosa se separaron e identificaron los horizontes del perfil, y se determinó su textura, color en húmedo, consistencia, estructura, porosidad, abundancia de raíces y formaciones especiales (Schoeneberger et al., 2012). La descripción en BM se realizó el 22/06/2023, en BP el 23/06/2023 y AP el 24/06/2023. La clasificación taxonómica de cada suelo se realizó a

nivel de subgrupo (Soil Survey Staff - Natural Resources Conservation Service: Home [NRCS]/ United States Department of Agriculture [USDA], 2014).

Análisis químicos, físicos y biológicos

Los análisis químicos fueron realizados en el laboratorio de Suelos y Foliare (LSF), los análisis físicos se realizaron en el Laboratorio de Recursos Naturales (LRN), y los microbiológicos en el Laboratorio de Microbiología Agrícola (LMA), del Centro de Investigaciones Agronómicas, de la Universidad de Costa Rica. Adicionalmente, las concentraciones de nutrientes fueron determinadas en el Laboratorio químico de Corporación Bananera Nacional (CORBANA).

En el LSF, el pH y la conductividad eléctrica del suelo se determinaron en agua, utilizando una relación 1:2.5 (Briceño & Pacheco, 1984). Las concentraciones de nutrientes se determinaron mediante un análisis químico con la solución extractora Olsen modificado (pH 8,5) y KCl (Díaz & Hunter, 1982). El contenido de bases y la capacidad de intercambio en acetato de amonio 1M (pH 7), se determinaron mediante absorción atómica (Soil Survey Staff - NRCS/USDA, 2014). El Fe y Al amorfos se determinaron mediante absorción atómica y en oxalato de amonio 0,2M (pH 3,5) (Blakemore et al., 1987). El contenido de carbono orgánico y nitrógeno total se determinaron mediante combustión seca (Horneck & Miller, 1998), mientras que la retención de fosfatos se determinó con el método descrito por Blakemore et al. (1987). La determinación de pH_{NaF} se realizó en forma cualitativa en campo, pero también en el laboratorio, utilizando NaF 1 N, y midiendo con un pHmetro Mettler Toledo, siguiendo la metodología descrita por Blakemore et al., (1987).

En el laboratorio químico de CORBANA las concentraciones de nutrientes se determinaron utilizando la solución extractora Mehlich III (Mehlich, 1984) y la técnica ICP/OES. El pH y conductividad eléctrica se determinaron en agua (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021; Zagal & Zadzwaka, 2007). La acidez y aluminio intercambiable se determinaron en KCl 1M y por medio de titulación (Grant, 1982; Henríquez & Cabalceta, 2012). El carbono orgánico se determinó por combustión seca (Elementar Analysensysteme GmbH, 2011).

La textura del suelo se determinó utilizando el método de Bouyoucos, utilizando un hidrómetro y calibrando por temperatura (Day, 2015), la densidad aparente con cilindros metálicos, la densidad de partículas con el método de determinación de volumen desplazado en un frasco volumétrico calibrado, y la retención de humedad en dos puntos (CC y PMP) con ollas de presión, se determinaron siguiendo la metodología descrita por Forsythe (1980). El carbono de la biomasa y respiración microbiana se determinaron utilizando la metodología descrita por Vance et al. (1987) y Anderson (1982), respectivamente.

RESULTADOS

Perfil de precipitación y temperatura

La zona de estudio tiene precipitaciones distribuidas durante todo el año, además, el histórico mensual evidencia que la evapotranspiración es menor a la precipitación (Figura 2.2). Por lo anterior, el régimen de humedad del suelo es údico. Por otra parte, la temperatura media se encuentra entre los 24 y 36°C durante el año, mientras que la mínima se encuentra entre 21 y 23°C, y la máxima entre 30 y 33 °C (Figura 2.3).

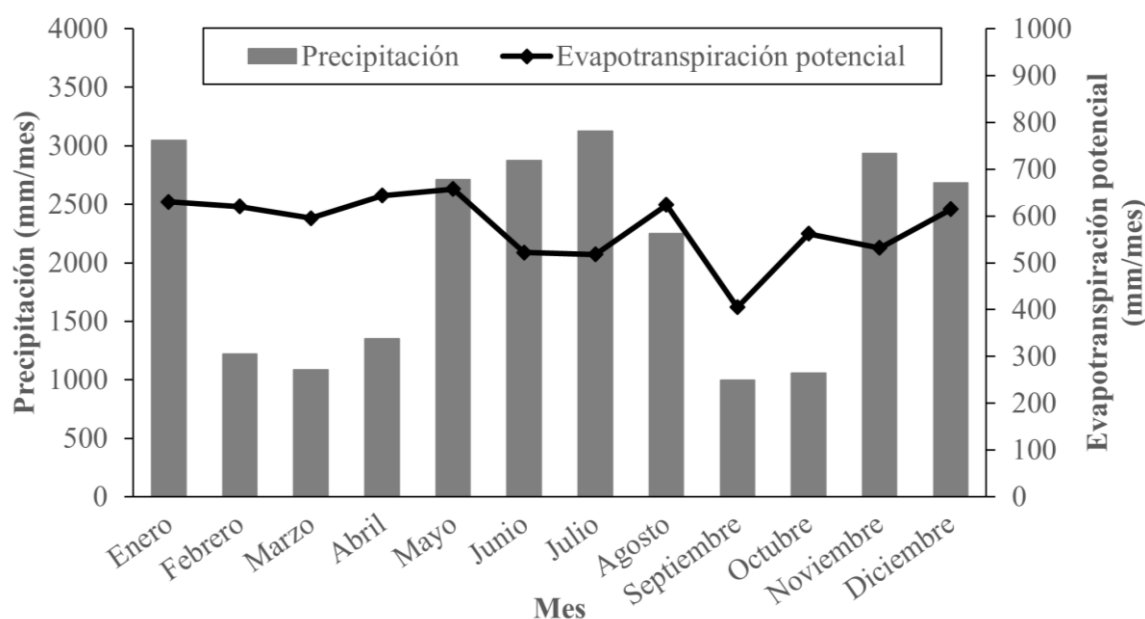


Figura 2.2. Perfil de precipitación acumulada y evapotranspiración potencial promedio por mes. Obtenido del histórico de datos del año 2014 a 2024, de la estación meteorológica finca Tortuguero, Cariari, Pococí, Limón.

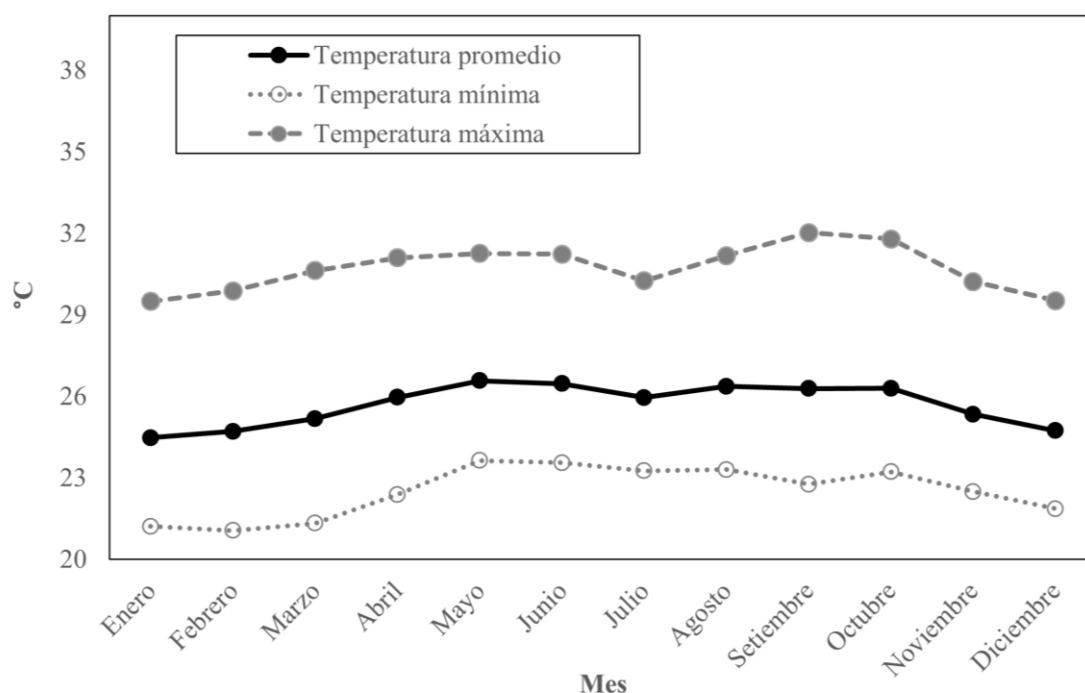


Figura 2.3. Perfil de temperaturas media, máxima y mínima promedio por mes. Obtenido del histórico de datos del año 2014 a 2024, de la estación meteorológica finca Tortuguero, Cariari, Pococí, Limón.

Descripción de los perfiles

Perfil del suelo de la condición BP

El perfil de la condición de BP se encuentra a una altura de 25 msnm y su relieve es plano. El nivel freático se encontraba entre 1,0 y 1,5 m. La erosión del sitio era leve y la pedregosidad ausente (Figura 2.4).

Características físicas y químicas de la condición BP

El horizonte Ap presentó buenas concentraciones de Ca, Mg y K (Cuadros 1 y 2), con respecto a los niveles apropiados para el cultivo de banano. La capacidad de intercambio catiónica (CIC) en este horizonte fue superior a $30 \text{ cmol (+) L}^{-1}$ y la saturación de bases mayor a 60 %, entre 10 y 90 cm. La acidez intercambiable fue limitante para el cultivo entre los 10 y 90 cm, con valores que van de 2,99 a $3,59 \text{ cmol (+) L}^{-1}$. El porcentaje de carbono orgánico total (COT) en Ap fue de 2,7 %, y presentó una reducción gradual en el perfil. La retención de fósforo osciló entre 56 y 65 % entre 0 y 45 cm. El pH en NaF fue de 9,94 en el horizonte Ap (Cuadros 2.1 y 2.2). La textura en el perfil fue Franco arcilloso y Arcilloso hasta los 90 cm. La densidad aparente no presentó valores limitantes

para el cultivo de banano en este perfil, pero si una alta resistencia del suelo a la penetración, además de evidencias de eventos de oxidación reducción que sugieren mal drenaje en este suelo. A lo anterior se atribuye el escaso crecimiento de raíces y presencia de raíces muertas en los primeros 90 cm de profundidad (Cuadro 2.3 y 2.4). La actividad biológica se considera baja, en comparación con la condición de alta productividad, el horizonte Ap presentó una respiración microbiana de $96 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ día}$ y una biomasa microbiana de $26 \text{ } \mu\text{g g}^{-1} \text{ suelo}$, atribuido a las limitaciones físicas que presenta este suelo.

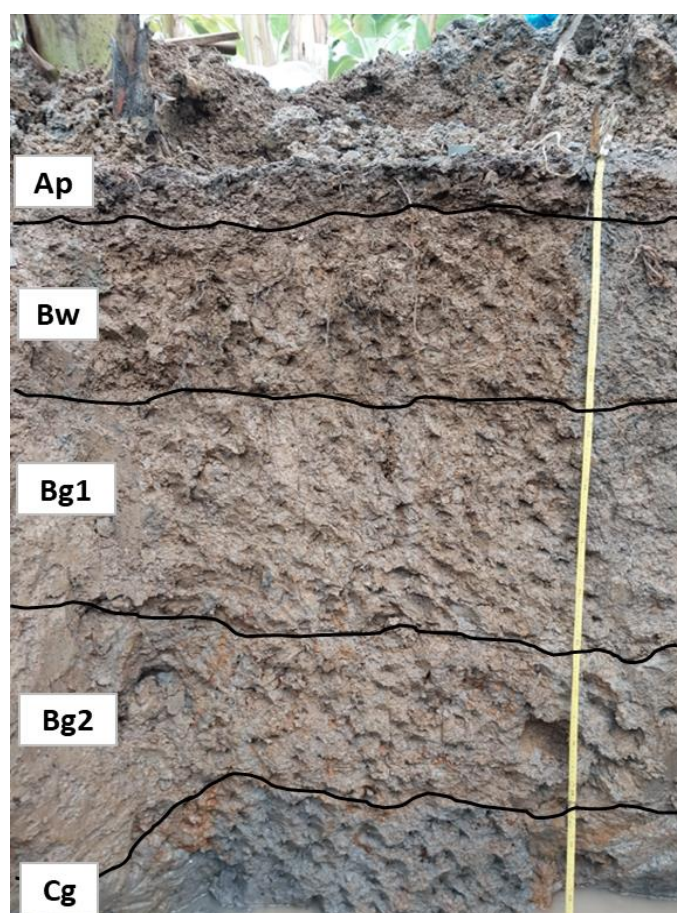


Figura 2.4. Perfil condición de cultivo BP (*Dystric Fluventic Eutrudepts*).

Clasificación taxonómica del suelo de la condición BP

De acuerdo con las características químicas y físicas de este suelo, la clasificación taxonómica fue *Dystric Fluventic Eutrudepts*. Este perfil presentó un epipedón ócrico, con un color del váluo de 4 en húmedo, y de 6 en seco, y un croma de 4 (Cuadro 4). Este epipedón tenía una profundidad de 10 cm, no presentó estructura rocosa ni sedimentos recientes y se extendió hasta un horizonte Bw de alteración. Además, tenía un horizonte

cámbico, con una profundidad de 35 cm, su textura fue clasificada como Franco Arcillosa. Este horizonte tenía estructura, así como evidencias de alteración, su color no cambió al exponerlo al aire ni condiciones ácuicas dentro de los 50 cm de la superficie del suelo, y presentó mayores contenidos de arcilla que el horizonte subyacente y suprayacente. El coeficiente de extensibilidad lineal (COEL) fue entre 0,04 y 0,10 para todos los horizontes del perfil.

A nivel de orden se clasificó como *Inceptisol*, por la presencia de un horizonte cámbico dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral, no presentó materiales sulfídicos dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. A nivel de suborden, por las condiciones de humedad predominantes, se clasificó como *Udepts*. A nivel de gran grupo, se clasificó como *Eutrudepts* ya que presentó una saturación de bases (por NH_4OAc) de 62 % a una profundidad entre 25 y 75 cm a partir de la superficie del suelo mineral. A nivel de subgrupo, se clasificó como *Dystric Fluventic Eutrudepts*, ya que no presentó carbonatos libres dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral, tenía una pendiente menor a 25 %, no se presentaron materiales transportados por el ser humano en los horizontes superficiales, y presentó un contenido de carbono orgánico de 0,48% a una profundidad de 125 cm.

Perfil del suelo de la condición AP

El perfil de la condición de AP se encuentra a una altura de 26 msnm y su relieve es plano. El nivel freático se encontraba a más de 2 m de profundidad. La erosión del sitio es leve y la pedregosidad ausente (Figura 2.5).

Características físicas y químicas de la condición AP

El horizonte Ap presentó concentraciones aceptables de Ca, Mg y K, con respecto a los niveles críticos establecidos para el cultivo de banano, y una CIC de $37 \text{ cmol (+) L}^{-1}$ (Cuadros 2.1 y 2.2). Este horizonte presentó una buena saturación de bases entre 10 y 90 cm de profundidad. La acidez intercambiable registrada no presentó valores limitantes, en todo el perfil fue menor a $0,5 \text{ cmol (+) L}^{-1}$. El COT en Ap fue de 6,2 %, con una reducción gradual en el perfil. La retención de fósforo fue superior a 80 %. El pH en NaF fue 10,24 en el horizonte Ap (Cuadros 2.1 y 2.2). La textura hasta 20 cm fue clasificada como Franco arcilloso, a mayores profundidades clasificó como Arcilloso. Las densidades

aparentes presentaron valores entre 0.9 y 1.0 g cm⁻³ hasta 145 cm. La respiración y el carbono de biomasa microbiana indican mayor actividad biológica que en BP y BM (Cuadro 2.3).

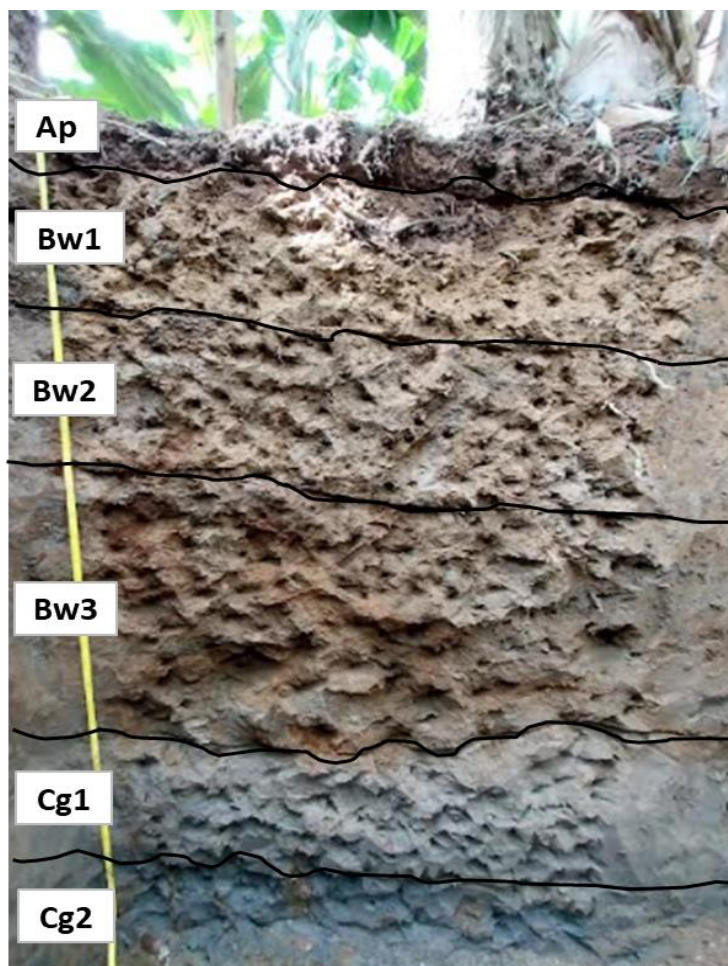


Figura 2.5. Perfil condición de cultivo AP (*Andic Dystrudepts*).

Clasificación taxonómica de la condición AP

De acuerdo con las características químicas y físicas de este suelo, la clasificación taxonómica del suelo fue *Andic Dystrudepts*. Este perfil tenía un epipedón Ócrico, con una profundidad de 10 cm, no presentaba estructura rocosa ni sedimentos recientes. Este horizonte de eluviación se extendía hasta un horizonte cámbico. Tenía un color con una brillantez (“value”) de 4 en húmedo, y de 6 en seco, y una pureza (“chroma”) de 4 (Cuadro 2.4). A 35 cm de profundidad tenía un horizonte cámbico, cuya textura fue clasificada como Franco Arcillosa. Además, el horizonte descrito tenía estructura, demostró evidencias de alteración, su color no cambió al exponerlo al aire ni presentó condiciones ácuicas

dentro de los 50 cm de la superficie del suelo, y presentó mayores contenidos de arcilla que el horizonte subyacente y suprayacente. El COEL de los horizontes de este perfil fue bajo, entre 0,01 y 0,10.

A nivel de orden se clasificó como *Inceptisol*, por la presencia de un horizonte cámbico dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral, no presentó materiales sulfídicos dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. A nivel de suborden, por el perfil de humedad predominante, se clasificó como *Udepts*. A nivel de gran grupo fue clasificado como *Dystrudepts* ya que presentaba una saturación de bases (por NH_4OAc) baja. No tenía un epipedón úmbico o mólico, tampoco presentaba un duripán, fragipán u otro horizonte cementado dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral. A nivel de subgrupo fue clasificado como *Andic Dystrudepts*. Tenía una fracción de tierra-fina dentro de los 75 cm de la superficie del suelo mineral, con una densidad aparente de 0,9 a $1,0 \text{ g cm}^{-3}$, y porcentajes de Al más la mitad de Fe (por oxalato de amonio) de 2,2 %.

Perfil del suelo de BM

El sitio se encuentra a una altura de 27 msnm. El relieve es plano y el nivel freático se encontraba a más de 2 m de profundidad durante la descripción. La erosión se describió como leve y la pedregosidad ausente (Figura 2.6).

Características físicas y químicas del suelo de BM

El horizonte A presentaba niveles altos de Ca, Mg y K, y una CIC de $39 \text{ cmol (+) L}^{-1}$, además el perfil presentó una buena saturación de bases entre 10 y 90 cm de profundidad. La acidez intercambiable presentó valores menores a $0,5 \text{ cmol (+) L}^{-1}$. El COT fue de 6,7 %, con una reducción gradual en el perfil. La retención de fósforo fue superior a 85 %. El pH en NaF fue 10,14 en el horizonte A (Cuadros 2.1 y 2.2). La textura de este perfil clasificó como Franco hasta 20 cm de profundidad. La densidad aparente presentó valores menores a 1 g cm^{-3} en todo el perfil. La actividad biológica en este perfil fue intermedia, en comparación con las dos condiciones de producción de banano (Cuadro 2.3).

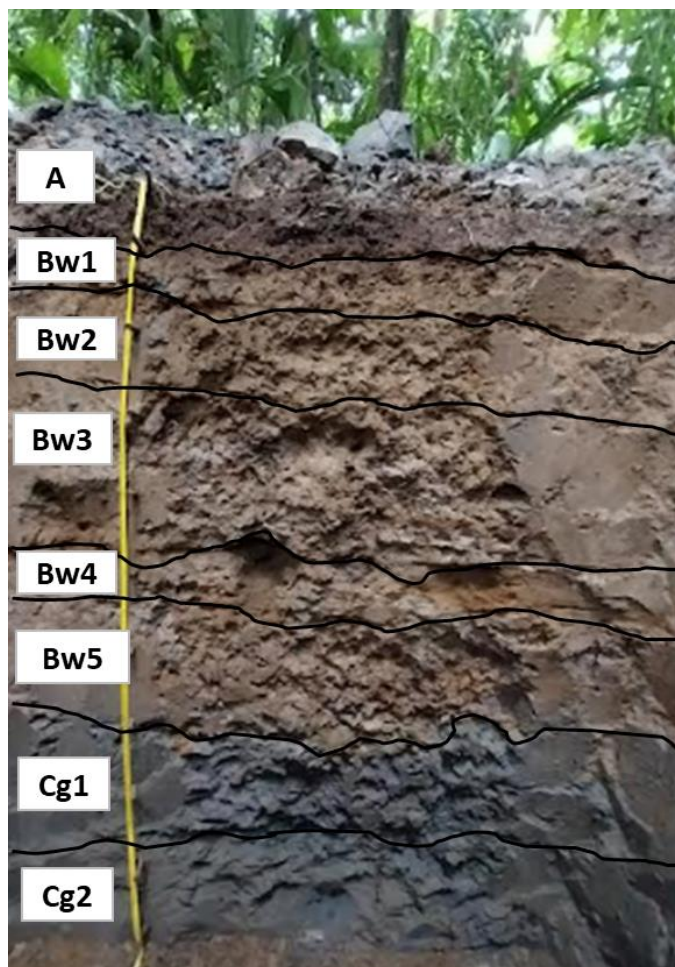


Figura 2.6. Perfil BM (*Andic Dystrudepts*).

Clasificación taxonómica del suelo de BM

De acuerdo con las características químicas y físicas de este suelo, se clasificó como *Andic Dystrudepts*. Este perfil presentó un epipedón ócrico hasta 10 cm de profundidad, no presentó estructura rocosa ni sedimentos recientes. Este horizonte eluvial se extendió hasta un horizonte cámbico de alteración Bw. Tenía un color con una brillantez (“value”) de 4 en húmedo, y de 6 en seco, y una pureza (“chroma”) de 4 (Cuadro 2.4). A 35 cm de profundidad presentó un horizonte cámbico, clasificado como Franco Arcilloso. Este horizonte tenía estructura, mostró evidencias de alteración, su color no cambió al exponerlo al aire ni presentó condiciones ácuicas dentro de los 50 cm de la superficie del suelo, y presentó mayores contenidos de arcilla que el horizonte subyacente y suprayacente. El COEL de los horizontes de este perfil fue bajo, entre 0,03 y 0,19.

A nivel de orden se clasificó como *Inceptisol*, por la presencia de un horizonte cámbico dentro de los 100 cm de la superficie y no presentó materiales sulfídicos dentro de los 50 cm de la superficie del suelo. A nivel de suborden, por el perfil de humedad predominante, se clasificó como *Udepts*. A nivel de gran grupo, el suelo se clasificó como *Dystrudepts*. Presentó una saturación de bases (por NH_4OAc) baja, no tenía epipedón úmbico o mólico ni presentan un duripán, fragipán u otro horizonte cementado dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral. A nivel de subgrupo se clasificó como *Andic Dystrudepts*. Tenía una fracción de tierra-fina dentro de los 75 cm de la superficie del suelo mineral, con una densidad aparente de 0,9 a 1,0 g cm^{-3} y porcentajes de Al más la mitad de Fe (por oxalato de amonio) de 2,2 %.

Cuadro 2.1. Características químicas del suelo en los tres sitios estudiados: bosque maduro (BM), y dos condiciones de producción de banano, baja productividad (BP) y alta productividad (AP).

| Sitio | Horizonte | Profundidad (cm) | A.I. (cmol(+) L ⁻¹) | COT (%) | N (%) | Ca* (cmol(+) L ⁻¹) | Mg* (cmol(+) L ⁻¹) | K* (cmol(+) L ⁻¹) | Na* (cmol(+) L ⁻¹) | SB | CIC | Sat. B (%) | Al& (%) | Fe& (%) | Ret. PO ₄ [#] (%) | pH NaF ^s |
|-------|-----------|------------------|---------------------------------|---------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------|------|------------|---------|---------|---------------------------------------|---------------------|
| BP | Ap | 0 - 10 | 0,1 | 2,7 | 0,3 | 15,2 | 6,6 | 2,7 | 0,1 | 24,6 | 38,0 | 64,7 | 0,5 | 1,7 | 56,4 | 9.94 |
| | Bw | 10_45 | 2,4 | 1,1 | 0,2 | 9,4 | 4,5 | 1,6 | 0,1 | 15,7 | 33,5 | 46,8 | 0,5 | 2,4 | 64,9 | - |
| | Bg 1 | 45 - 90 | 1,6 | 0,5 | 0,1 | 13,3 | 6,0 | 1,3 | 0,2 | 20,8 | 33,2 | 62,6 | - | - | - | - |
| | Bg 2 | 90 - 125 | 0,2 | 0,5 | 0,1 | 15,1 | 7,6 | 1,0 | 0,2 | 23,9 | 33,3 | 71,6 | - | - | - | - |
| | Cg | 125 - 170 | 0,3 | 0,5 | 0,1 | 14,7 | 7,7 | 0,8 | 0,3 | 23,5 | 35,1 | 67,1 | - | - | - | - |
| AP | Ap | 0 - 20 | 0,1 | 6,2 | 0,7 | 12,7 | 3,5 | 1,3 | 0,2 | 17,6 | 37,8 | 46,6 | 1,7 | 1,0 | 86,1 | 10.24 |
| | Bw 1 | 20 - 50 | 0,9 | 0,9 | 0,1 | 2,7 | 0,7 | 0,8 | 0,1 | 4,3 | 22,9 | 18,6 | 0,9 | 0,5 | 82,5 | - |
| | Bw 2 | 50 - 80 | 1,0 | 0,4 | 0,1 | 4,1 | 1,2 | 0,6 | 0,2 | 6,1 | 16,9 | 35,9 | - | - | - | - |
| | Bw 3 | 80 - 145 | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 5,4 | 1,6 | 0,6 | 0,2 | 7,7 | 14,4 | 53,6 | - | - | - | - |
| | Cg 1 | 145 - 185 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 4,2 | 1,3 | 0,2 | 0,1 | 5,8 | 6,5 | 89,0 | - | - | - | - |
| | Cg 2 | 185 - 200 | 0,3 | 0,2 | 0,0 | 7,0 | 3,3 | 0,4 | 0,2 | 10,8 | 12,8 | 84,1 | - | - | - | - |
| BM | A | 0 - 20 | 0,2 | 6,7 | 0,6 | 10,2 | 2,6 | 0,4 | 0,2 | 13,3 | 39,1 | 34,1 | 1,4 | 1,0 | 86,1 | 10.14 |
| | Bw 1 | 20-30 | 0,2 | 0,9 | 0,1 | 6,7 | 4,3 | 0,4 | 0,4 | 11,8 | 25,4 | 46,3 | 0,5 | 1,1 | 57,4 | - |
| | Bw 2 | 30 - 55 | 0,1 | 0,4 | 0,0 | 6,3 | 5,2 | 0,3 | 0,5 | 12,2 | 22,2 | 54,9 | - | - | - | - |
| | Bw 3 | 55-95 | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 8,7 | 5,4 | 0,5 | 0,5 | 15,0 | 25,4 | 59,1 | - | - | - | - |
| | Bw 4 | 95 - 105 | 0,2 | 0,5 | 0,1 | 7,5 | 4,0 | 0,5 | 0,4 | 12,4 | 21,7 | 57,2 | - | - | - | - |
| | Bw 5 | 105-145 | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 11,5 | 6,9 | 0,4 | 0,3 | 19,1 | 26,3 | 72,6 | - | - | - | - |
| | Cg 1 | 145-175 | 0,7 | 0,3 | 0,0 | 6,0 | 3,4 | 0,4 | 0,2 | 9,9 | 14,9 | 66,6 | - | - | - | - |
| | Cg 2 | 175-200 | 1,1 | 0,2 | 0,0 | 5,0 | 2,7 | 0,4 | 0,2 | 8,2 | 13,1 | 63,1 | - | - | - | - |

A.I.: Acidez intercambiable. COT: Carbono orgánico total. Sat.B: Porcentaje de saturación de bases. SB: Suma de bases. CIC: capacidad de intercambio de cationes aparente. *Ca-Mg-K-Na: Extracción en acetato de amonio. &Fe y Al extraído en oxalato de amonio (Soil Survey Staff 2014). # Retención de PO₄ de acuerdo con Blakemore et al. (1981). ^spH NaF: determinado con NaF 1 N (Fieldes & Perrott, 1966).

Cuadro 2.2. Fertilidad disponible en el suelo en los tres sitios estudiados: bosque maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, baja productividad (BP) y alta productividad (AP).

| Sitio | Horizonte | Profundidad (cm) | COT (%) | pH | A.I. (cmol(+) L ⁻¹) | Ca* (cmol(+) L ⁻¹) | Mg (cmol(+) L ⁻¹) | K (cmol(+) L ⁻¹) | Na (cmol(+) L ⁻¹) | C.E. (mS cm ⁻¹) | P (mg L ⁻¹) | Fe (mg L ⁻¹) | Cu (mg L ⁻¹) | Zn (mg L ⁻¹) | Mn (mg L ⁻¹) | B (mg L ⁻¹) |
|-------|-----------|------------------|---------|------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| BP | Ap | 0 - 10 | 3,31 | 6,73 | 0,07 | 17,9 | 7,13 | 2,14 | 0,06 | 0,218 | 129 | 322 | 8,7 | 33,3 | 43 | 0,89 |
| | Bw | 10 - 45 | 1,84 | 5,16 | 3,59 | 6,04 | 3,47 | 1,15 | 0,08 | 0,116 | 25 | 293 | 5,3 | 2 | 10 | 0 |
| | Bg 1 | 45 - 90 | 0,65 | 5,05 | 2,99 | 8,49 | 3,99 | 0,94 | 0,14 | 0,063 | 7 | 247 | 5,9 | 1,2 | 26 | 0,0 |
| | Bg 2 | 90 - 125 | 0,44 | 6,25 | 0,14 | 11,9 | 6,04 | 0,9 | 0,13 | 0,044 | 19 | 257 | 6,9 | 2 | 24 | 0,0 |
| | Cg | 125 - 170 | 0,42 | 5,94 | 0,17 | 12 | 6,28 | 0,61 | 0,24 | 0,06 | 15 | 391 | 8,7 | 1,4 | 53 | 0,0 |
| AP | Ap | 0 - 20 | 4,15 | 5,72 | 0,21 | 5,16 | 2,07 | 0,85 | 0,07 | 0,154 | 49 | 89 | 2,4 | 7,5 | 14 | 0,22 |
| | Bw 1 | 20 - 50 | 1,33 | 5,43 | 0,27 | 2 | 0,52 | 0,37 | 0,07 | 0,089 | 2 | 57 | 0,6 | 0,2 | 5 | 0,01 |
| | Bw 2 | 50 - 80 | 0,22 | 6,04 | 0,15 | 6,03 | 2,03 | 0,22 | 0,17 | 0,039 | 6 | 181 | 2,1 | 0,4 | 14 | 0,0 |
| | Bw 3 | 80 - 145 | 0,17 | 6,26 | 0,11 | 5,11 | 1,57 | 0,72 | 0,14 | 0,023 | 12 | 295 | 1,4 | 0,6 | 8 | 0,0 |
| | Cg 1 | 145 - 185 | 0,06 | 7,07 | 0 | 5,75 | 1,58 | 0,3 | 0,12 | 0,021 | 15 | 117 | 3,8 | 0,4 | 6 | 0,0 |
| | Cg 2 | 185 - 200 | 0,19 | 4,38 | 1,15 | 7,7 | 3,82 | 0,44 | 0,17 | 0,702 | 10 | 456 | 13,9 | 2 | 20 | 0,0 |
| BM | A | 0 - 20 | 5,95 | 5,64 | 0,07 | 13,2 | 2,45 | 0,51 | 0,20 | 0,258 | 26 | 135 | 4,2 | 1,9 | 17 | 0,35 |
| | Bw 1 | 20-30 | 1,32 | 6,12 | 0,13 | 5,45 | 2,52 | 0,36 | 0,23 | 0,042 | 4 | 107 | 1,8 | 0,8 | 23 | 0,02 |
| | Bw 2 | 30 - 55 | 0,34 | 6,56 | 0,07 | 5,93 | 4,91 | 0,18 | 0,40 | 0,026 | 3 | 188 | 3,4 | 0,9 | 31 | 0,0 |
| | Bw 3 | 55-95 | 0,16 | 6,81 | 0,08 | 5,98 | 4,3 | 0,23 | 0,33 | 0,019 | 10 | 244 | 4,4 | 0,8 | 21 | 0,0 |
| | Bw 4 | 95 - 105 | 0,11 | 6,77 | 0,07 | 5,86 | 3,01 | 0,39 | 0,25 | 0,012 | 14 | 208 | 2,6 | 0,7 | 2 | 0,0 |
| | Bw 5 | 105-145 | 0,43 | 6,87 | 0,01 | 10,5 | 6,22 | 0,31 | 0,25 | 0,020 | 12 | 248 | 11 | 1 | 16 | 0,0 |
| | Cg 1 | 145-175 | 0,26 | 5,13 | 0,31 | 5,26 | 2,83 | 0,42 | 0,17 | 0,290 | 5 | 785 | 15,4 | 1,2 | 63 | 0,0 |
| | Cg 2 | 175-200 | 0,12 | 4,43 | 1,47 | 4,16 | 2,37 | 0,4 | 0,15 | 0,227 | 17 | 878 | 12,1 | 2,1 | 28 | 0,0 |

*Extracción realizada en el laboratorio químico de CORBANA, con solución Mehlich III. pH determinado en agua. CE: determinada en agua, relación 1:5. A.I.: determinada mediante extracción con KCl 1M y titulación. COT: determinado por combustión seca.

Cuadro 2.3. Características físicas y biológicas del suelo en los tres sitios estudiados: bosque maduro (BM), y dos condiciones de cultivo de banano, baja productividad (BP) y alta productividad (AP).

| Sitio | Horizonte | Profundidad (cm) | Textura | Arena (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | <i>ps</i> (g cm ⁻³) | <i>pa</i> (g cm ⁻³) | <i>f</i> (%) | RP (MPa) | AD (%) | RM. (mgC-CO ₂ kg ⁻¹ día) | CBM. (μg g ⁻¹ suelo) |
|-------|-----------|------------------|-----------------------|-----------|----------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------|----------|--------|--|---------------------------------|
| BP | Ap | 0 - 10 | FRANCO ARCILLOSO | 27 | 41 | 32 | 2,3 | 0,5 | 78,3 | 0,67 | 14,5 | 96 | 26 |
| | Bw | 10 - 45 | FRANCO ARCILLOSO | 25 | 35 | 40 | 2,3 | 0,4 | 82,6 | 0,93 | 11,9 | 101 | 132 |
| | Bg 1 | 45 - 90 | ARCILLOSO | 22 | 36 | 42 | 2,4 | 0,6 | 75,0 | 0,93 | 9,5 | 50 | 149 |
| | Bg 2 | 90 - 125 | FRANCO ARCILLOSO | 45 | 20 | 35 | 2,3 | 0,5 | 78,3 | 0,73 | 10,3 | 33 | 93 |
| | Cg | 125 - 170 | ARCILLOSO | 25 | 33 | 42 | 2,6 | 0,7 | 73,1 | 0,40 | 10,5 | 151 | 84 |
| AP | Ap | 0 - 20 | FRANCO ARCILLOSO | 35 | 25 | 40 | 2,6 | 0,9 | 65,4 | 0,87 | 23,1 | 297 | 238 |
| | Bw 1 | 20 - 50 | ARCILLOSO | 30 | 25 | 45 | 2,6 | 0,9 | 65,4 | 0,80 | 22,6 | 156 | 173 |
| | Bw 2 | 50 - 80 | ARCILLOSO | 17 | 23 | 60 | 2,8 | 1,0 | 64,3 | 0,93 | 27,4 | 189 | 292 |
| | Bw 3 | 80 - 145 | ARCILLOSO | 22 | 26 | 52 | 2,8 | 1,2 | 57,1 | 1,07 | 30,0 | 148 | 51 |
| | Cg 1 | 145 - 185 | ARCILLOSO | 30 | 23 | 47 | 2,0 | 0,5 | 75,0 | 0,93 | 21,9 | 216 | 91 |
| | Cg 2 | 185 - 200 | ARCILLOSO | 27 | 26 | 47 | 2,5 | 0,8 | 68,0 | 0,33 | 14,3 | 169 | 96 |
| BM | A | 0 - 20 | FRANCO | 45 | 30 | 25 | 2,7 | 1,0 | 63,0 | 0,40 | 23,2 | 18 | 90 |
| | Bw 1 | 20-30 | ARCILLOSO | 10 | 10 | 80 | 2,6 | 0,9 | 65,4 | 0,67 | 23,2 | 32 | 102 |
| | Bw 2 | 30 - 55 | FRANCO ARCILLOSO | 30 | 40 | 30 | 2,6 | 0,9 | 65,4 | 1,33 | 22,5 | 89 | 80 |
| | Bw 3 | 55-95 | FRANCO | 32 | 43 | 25 | 2,6 | 0,6 | 76,9 | 0,80 | 24,9 | 61 | 99 |
| | Bw 4 | 95 - 105 | FRANCO ARCILLOSO | 22 | 46 | 32 | 2,6 | 1,2 | 53,8 | 0,73 | 23,9 | 14 | 65 |
| | Bw 5 | 105-145 | FRANCO ARCILLO LIMOSO | 20 | 45 | 35 | 2,5 | 0,6 | 76,0 | 0,47 | 6,9 | 64 | 79 |
| | Cg 1 | 145-175 | ARCILLO LIMOSO | 17 | 41 | 42 | 2,4 | 0,7 | 70,8 | 0,70 | 17,3 | 47 | 150 |
| | Cg 2 | 175-200 | FRANCO ARCILLOSO | 25 | 40 | 35 | 2,6 | 0,7 | 73,1 | 1,00 | 31,5 | 76 | 75 |

f: porosidad. *ps*: densidad de partículas. *pa*: densidad aparente. RP: resistencia del suelo a la penetración, medido con un penetrómetro Eijkelkamp®. AD: agua disponible. RM: respiración microbiana. CBM: carbono de biomasa microbiana.

Cuadro 2.4. Descripción morfológica y perfil de los tres suelos estudiados: bosque maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, baja productividad (BP) y alta productividad (AP).

| Sitio | Horizonte | Profundidad (cm) | Color (húmedo) | Color (Seco) | Estructura | Consistencia (húmedo) | Formaciones especiales | Poros | Raíces | Límite |
|-------|-----------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------|-----------------------|------------------------------------|--------|---------------------------|---------------|
| BP | Ap* | 0 - 10 | 10 YR 4/4 | 10 YR 6/4 | SBK 2* | FI MS MP | – | 3 CMF* | 3 CMF se observan muertas | Plano gradual |
| | Bw | 10 - 45 | 10 YR 5/3 (90%) 5 YR 5/8 (10%) | 10 YR 7/3 (90%) 5 YR 6/8 (10%) | SBK 2 | FI MS VP | Características redoximórficas 30% | 3 CMF | 2 CMF se observan muertas | Plano gradual |
| | Bg 1 | 45 - 90 | 10 YR 5/3 (90%) 7,5 YR 5/6 (10%) | 10 YR 7/3 (90%) 7,5 YR 7/6 (10%) | SBK 2 | FI VS VP | Características redoximórficas 20% | 1 MF | 1 MF se observan muertas | Plano gradual |
| | Bg 2 | 90 - 125 | 10 YR 5/2 (85%) 5 YR 5/8 (15%) | 10 YR 7/2 (85%) 5 YR 6/8 (15%) | SBK 2 | FI VS VP | Características redoximórficas 50% | 1 MF | 1 F se observan muertas | Plano gradual |
| | Cg | 125 - 170 | 10 YR 5/1 | 10 YR 7/1 | MA 0 | VS VP | Características redoximórficas | 1 F | 0 | Plano gradual |
| AP | Ap | 0 - 20 | 10 YR 3/4 | 10 YR 5/4 | SBK 2 | FI S P | – | 3 CM | 3 CMF | Plano gradual |
| | Bw 1 | 20 - 50 | 10 YR 4/6 | 10 YR 7/4 | SBK 2 | FI S P | – | 3 CM | 3 CMF | Plano gradual |
| | Bw 2 | 50 - 80 | 10 YR 5/6 (40%) 10 YR 5/1 (60%) | 10 YR 6/6 (40%) 10 YR 7/1 (60%) | ABK 2 | FI S P | Características redoximórficas 10% | 3 FM | 3 CM | Plano gradual |
| | Bw 3 | 80 - 145 | 7.5 YR 3/4 | 7.5 YR 5/4 | ABK 1 | FI S P | Características redoximórficas 20% | 1 F | 1 CM | Plano gradual |
| | Cg 1 | 145 - 185 | 10 YR 4/1 | 10 YR 6/1 | ABK 1 | VS VP | Características redoximórficas | 1 F | 0 | Plano gradual |
| | Cg 2 | 185 - 200 | 10 YR 3/1 | 10 YR 7/1 | MA 0 | VS VP | Características redoximórficas | 0 | 0 | Plano gradual |
| BM | A | 0 - 20 | 10 YR 2/2 | 10 YR 4/3 | SBK 2 | FI S P | – | 3 CMF | 3 CMF | Plano gradual |
| | Bw 1 | 20-30 | 10 YR 4/6 | 10 YR 6/6 | SBK 2 | FI S P | – | 3 CMF | 3 CMF | Plano gradual |
| | Bw 2 | 30 - 55 | 10 YR 5/4 | 10 YR 7/4 | SBK 2 | FI S P | – | 2 MF | 0 | Plano gradual |
| | Bw 3 | 55-95 | 10 YR 5/3 | 10 YR 7/3 | SBK 2 | FI S P | – | 1 F | 0 | Plano gradual |
| | Bw 4 | 95 - 105 | 10 YR 3/6 | 10 YR 5/6 | SGR 0 | L SO PO | – | 1 F | 0 | Plano gradual |
| | Bw 5 | 105-145 | 10 YR 5/3 | 10 YR 6/3 | ABK 2 | FI VS VP | – | 1 F | 0 | Plano gradual |
| | Cg 1 | 145-175 | 10 YR 3/1 | 10 YR 6/1 | MA 0 | VS VP | Características redoximórficas | 0 | 0 | Plano gradual |
| | Cg 2 | 175-200 | 10 YR 3/1 | 10 YR 7/3 | SGR 0 | L SO PO | Características redoximórficas | 0 | 0 | Plano gradual |

*Abreviaturas y códigos de descripción de acuerdo con Shoeneberger et al. (2012).

CONCLUSIONES

Los tres suelos fueron clasificados a nivel de Subgrupo. Estos estudios son muy importantes para entender la influencia de características y propiedades intrínsecas del suelo en su calidad.

Los suelos de la condición de AP y BM clasificaron como *Andic Dystrudepts*, mientras que en la condición de BP el suelo fue clasificado como *Dystric Fluventic Eutrudepts*.

Los tres sitios compartieron características de clasificación a nivel de orden y suborden, sin embargo, algunas diferencias los segregaron a nivel de gran grupo y subgrupo. Estas diferencias fueron principalmente mayor fertilidad química, mayor resistencia del suelo a la penetración y limitaciones de drenaje en la condición de BP, mientras que en la condición de AP y BM los suelos presentaron mayores contenidos de carbono orgánico total, actividad biológica y menores limitaciones físicas.

CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUELOS DE ALTA Y BAJA PRODUCTIVIDAD EN UNA FINCA BANANERA Y UN BOSQUE EN EL CARIBE DE COSTA RICA

RESUMEN

Mantener o mejorar la calidad del suelo asegura la sostenibilidad de la producción en los sistemas agrícolas. En los últimos años, las plantaciones de banano han experimentado reducciones en la productividad, atribuida al deterioro de la calidad del suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad del suelo en dos condiciones de producción de banano, alta (AP) y baja productividad (BP) y un bosque secundario maduro (BM) en el Caribe de Costa Rica, a través de índices de calidad del suelo obtenidos mediante dos metodologías distintas. Para lograrlo, se recolectaron muestras de suelo y se analizaron indicadores químicos, físicos y biológicos, se midieron variables biométricas, del sistema radical y estado nutricional de la planta. Con la información generada, se obtuvieron índices de calidad con dos metodologías, Marco de Evaluación del Manejo del Suelo (SMAF) y Distribución Normal Acumulativa (CND). Con ambas metodologías, los índices de calidad mostraron la siguiente jerarquía: $BM > AP > BP$. En contraste con el conjunto total de indicadores (TDS), los conjuntos de indicadores reducidos (MDS_{PCA} y MDS_{EO}) fueron sensibles a las diferencias en la calidad del suelo en los sitios evaluados. Se recomienda usar el MDS_{PCA} para evaluar la calidad del suelo en condiciones similares a las de este estudio pues elimina la subjetividad y la redundancia y autocorrelación entre indicadores. En contraste con BM, las dos condiciones de producción de banano presentaron mayor compactación, fertilidad química y acidez, menor carbono orgánico y actividad biológica. La condición de AP presentó mejores indicadores físicos, biológicos y biométricos que BP.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de banano se desarrolla en 42 512 hectáreas del territorio costarricense y produce 100 millones de cajas de 18 kg de banano anuales (Corporación Bananera Nacional [CORBANA], 2022), lo que posiciona a Costa Rica entre los principales exportadores del mundo. La actividad bananera en el país comenzó hace ciento cincuenta años y se orientó hacia un modelo de monocultivo extensivo (Goluboay & Vega, 1988). Históricamente, esta actividad ha tenido un impacto significativo en la economía local y a nivel

nacional (CORBANA, 2022). Durante los años 80 y 90, debido al programa de fomento bananero el área cultivada creció considerablemente (Jadin et al., 2016) para establecer plantaciones y satisfacer la creciente demanda de fruta en los principales mercados (Gauggel et al., 2005). Los bosques fueron la principal fuente de tierras para desarrollar esta actividad (Gibbs et al., 2010), en este proceso se inició la degradación de algunas de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Guimarães et al., 2014). A pesar de contar con estándares claros para la selección de suelos aptos (Jaramillo & Vásquez, 1990), algunas plantaciones de banano se establecieron con estudios inadecuados (Gauggel et al., 2005), ocasionando una reducción en la productividad de 100 a 300 cajas ha⁻¹ año⁻¹, después de siete años de producción sostenida, atribuida el deterioro de la calidad del suelo (Zuñiga et al., 2009).

El término calidad de suelo está influenciado por las propiedades inherentes y dinámicas de este (Bünemann et al., 2018), que le permiten funcionar dentro de sus límites ecosistémicos, mantener la productividad biológica y la calidad del ambiente (Doran & Parkin, 1994). En ese sentido, mantener o mejorar la calidad del suelo es fundamental para incrementar y asegurar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Biswas et al., 2023; Marion et al., 2022). El aumento en la calidad del suelo ha sido relacionado a la atención y mejora de factores limitantes que conducen a mejores rendimientos (Miner et al., 2020). La calidad de suelo está influenciada por los atributos inherentes (Larson & Pierce, 1991) su naturaleza viva y sus procesos biológicos (Bünemann et al., 2018). Como resultado de la contribución de indicadores químicos, físicos y biológicos de la calidad del suelo (ICS), la calidad se expresa cuantitativamente como una función de dichos indicadores (Larson & Pierce, 1991). Los ICS son específicos a la función y servicio ecosistémico del suelo (Afanador et al., 2020), sensibles a cambios, y se comparan con sitios de poca alteración (Pattison et al., 2008). La integración de ICS resulta en un índice de la calidad del suelo (InCS) (Cherubin et al., 2016; Marion et al., 2022). En el presente trabajo se obtuvo un InCS a través del Marco de Evaluación del Manejo del Suelo (SMAF) (Andrews et al., 2004), y la Distribución Normal Acumulativa (CND) (Moebius-Clune et al., 2016), utilizada por primera vez en Costa Rica para obtener InCS en el cultivo de banano.

Investigaciones recientes sobre la calidad del suelo en sistemas de producción de banano han tenido lugar fuera del continente, en China (Zhong et al., 2014; Zhong et al.,

2021), Australia (Pattison et al., 2008; Rasiah et al., 2009), África (Mulat et al., 2021; Walker et al., 2022), e Irán (Samaei et al., 2022). En América destacan estudios en Venezuela (Delgado et al., 2010; González et al., 2021; Olivares et al., 2022; Rey et al., 2009), Colombia (Afanador et al., 2020; Herrera et al., 2017), Panamá (Villarreal et al., 2013), y Brasil (Mello da Silva et al., 2021). Estos trabajos proporcionan una referencia importante, sin embargo, debido a factores como el clon o cultivar, las condiciones climáticas y los tipos de suelo estudiado, sus resultados no son extrapolables a las condiciones de cultivo en Costa Rica.

Por otra parte, en condiciones locales, el conocimiento sobre la calidad del suelo ha sido generado por Cerda et al. (2008) y Cornwell (2014) quienes compararon diferentes sistemas agrícolas en los que figura el banano como monocultivo o en asocio. Por otro lado, otros autores describieron la contribución de ICS físicos, químicos y biológicos en fincas comerciales de banano (Acuña et al., 2006; Londoño, 2006). Pese a lo anterior, los estudios mencionados fueron realizados hace más de diez años y no abordan de manera integral los principales impactos del cultivo de banano y su manejo en la calidad del suelo, ni cuánto se ha afectado el potencial productivo de los suelos, ni si esa afectación es reversible mediante prácticas agrícolas sostenibles y regenerativas.

Las investigaciones disponibles han utilizado los siguientes indicadores: textura, densidad aparente, resistencia a la penetración, pH, cationes de intercambio (Ca, Mg, K), capacidad de intercambio catiónico (CIC), acidez intercambiable, carbono orgánico total, respiración microbiana, carbono de la biomasa microbiana, actividad enzimática y nemátodos de vida libre (Afanador-Barajas et al., 2020; Cornwell, 2014; Culma et al., 2017; Delgado, Rosales, et al., 2010; Mulat et al., 2021; Olivares et al., 2022; Pattison et al., 2008; Rasiah et al., 2009; Rey et al., 2009; Samaei et al., 2022; Silva et al., 2022; Villarreal-Núñez et al., 2013).

Las evidencias del deterioro de la calidad de suelo en plantaciones de banano, su relación con la productividad, y la búsqueda de respuestas sobre la sostenibilidad de esta actividad motivaron el desarrollo del presente trabajo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad del suelo en dos condiciones de producción de banano, alta (AP) y baja productividad (BP) y un bosque secundario maduro (BM) en el Caribe de Costa Rica, a través de índices de calidad del suelo (InCS) obtenidos mediante dos metodologías

distintas. Además, se compararon los ICS químicos, físicos, biológicos, con indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta en cada uno de los sitios estudiados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y generalidades de los sitios

Los sitios estudiados se ubican en finca Tortuguero, distrito Cariari, cantón de Pococí, en la provincia de Limón, en una finca dedicada a la producción de banano para exportación, propiedad de Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte S.A (CDADM) (Figura 3.1). Los tres sitios se ubican en la zona de vida de bosque muy húmedo tropical (bmh-T) (Holdridge, 1987; Rojas, 2011). Las elevaciones en la zona oscilan entre 0 y 30 msnm, el rango de precipitación anual es de 5000 a 6000 mm, en promedio 263 días con lluvia al año, y la temperatura promedio anual es de 26 °C (con un rango de 21 °C a 32 °C) (Rojas, 2011).

De acuerdo con un histórico de los últimos seis años, el área de finca Tortuguero, definida como una condición de alta productividad (AP), produjo en promedio 2433 cajas $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (min. 2178 – max. 2916 cajas), mientras que en la condición de baja productividad (BP) produjo en promedio 2144 cajas $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (min. 1966 – max. 2296 cajas). Ambas áreas fueron sembradas en 1992 con *Musa* (Grupo AAA) 'Valery' (subgrupo Cavendish), mientras que el área de bosque corresponde a un bosque secundario maduro (BM), sin intervención desde hace 30 años (Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico [SINIGIR], 2023). El área total de AP contempla 6,0 hectáreas, la de BP 2,0 hectáreas y BM 3,9 hectáreas (Figura 3.1).

Los suelos de cada una de las áreas bajo estudio fueron clasificados a nivel de suborden como *Dystric Fluventic Eutrudepts* en BP, y *Andic Dystrudepts* en AP y BM (Schoeneberger et al., 2012; Soil Survey Staff, 2014).

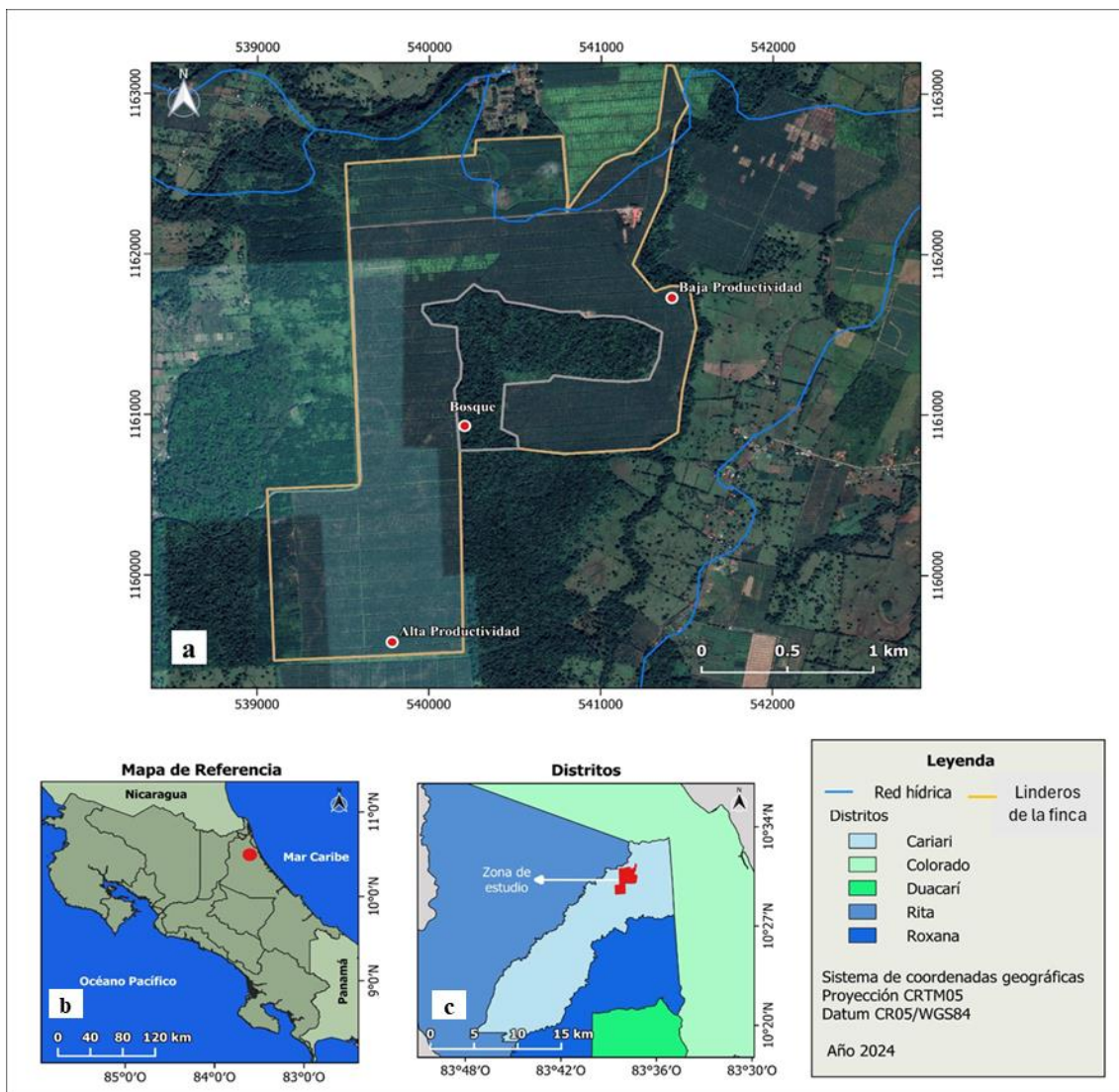


Figura 3.1. a. Ubicación específica de cada una de las áreas estudiadas en finca Tortuguero, bosque secundario maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP). b. Localización de finca Tortuguero en la provincia de Limón. c. Ubicación de finca Tortuguero en el distrito de Cariari.

Recolección de muestras y trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó en los meses de octubre y noviembre del año 2023. En cada condición de producción de banano (AP y BP), se muestreó un área de aproximadamente 1,5 ha, realizando un recorrido en zigzag. En ambas condiciones el área de muestreo se conformó con 15 “boquetes”, de aproximadamente 1000 m² cada uno, mientras que en BM se seleccionó un polígono de 4.5 ha, de aproximadamente 300 m de largo por 150 m de ancho. En las áreas se recolectaron 25 muestras de suelo, cada una compuesta por tres submuestras. La separación entre muestras fue de aproximadamente 20-60 m en AP y BP, y de 10-12 m en BM, y la separación entre submuestras de 3 m. Las

muestras se obtuvieron con un barreno holandés, a una profundidad de 0-30 cm. En las áreas de AP y BP, las muestras de suelo se recolectaron en la banda de fertilización, frente al hijo de sucesión de la planta (Ortega et al., 2019), mientras que en BM fueron tomadas en áreas libres de vegetación para evitar la interferencia de raíces.

Los ICS biométricos se midieron en 100 plantas de AP y 100 plantas de BP, aledañas al punto de recolección de la muestra de suelo. Las hojas funcionales, circunferencia y altura del hijo de sucesión fueron medidas en plantas con inflorescencia visible (al momento de la floración) y en plantas con fruta de 11 o 12 semanas desde el momento de poner la bolsa plástica para proteger el racimo (edad de cosecha) (Ortega et al., 2019). El conteo de manos por racimo se hizo en campo, con el racimo colgando de la planta, siguiendo la metodología descrita por Vargas et al. (2010).

La determinación del estado nutricional de la planta se realizó en la hoja número tres, tomando la sección central de cada semi limbo, sin incluir la vena central, en plantas en edad de floración (Martin-Prevel, 1974) e interpretados con base en los niveles óptimos para banano (Martin-Prével et al., 1988). En cada sitio se tomaron 25 muestras de tejido foliar, siguiendo el recorrido descrito en el muestreo de suelo. La recolección de muestras de indicadores del sistema radical de la planta se realizó con la metodología descrita por Vargas y Araya (2018). En cada sitio se tomaron 25 muestras de raíz en la interfase madre-hijo de sucesión. Utilizando un palín se realizó un hoyo de 15 cm de largo por 15 cm de ancho por 30 cm de profundidad (equivalente a un volumen de 6,750 cm³ de suelo), y se colectaron todas las raíces presentes.

Análisis químicos, físicos y biológicos

Las concentraciones de nutrientes en suelo se determinaron en el laboratorio químico de CORBANA, utilizando la solución extractora Mehlich III (Mehlich, 1984) y la técnica ICP/OES. El pH y conductividad eléctrica se determinaron en agua (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021; Zagal & Zadzwaka, 2007). La acidez y aluminio intercambiable se analizaron con KCl 1M y por medio de titulación (Grant, 1982; Henríquez & Cabalceta, 2012). Para determinar el carbono orgánico se utilizó la metodología de combustión seca (Elementar Analysensysteme GmbH, 2011). Los indicadores físicos del suelo se determinaron en el Laboratorio de Recursos Naturales, del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de

Costa Rica. La resistencia del suelo a la penetración se midió en campo con un penetrómetro marca Eijkelkamp® modelo 06.01SB, la densidad aparente con cilindros metálicos, y la retención de humedad en dos puntos, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (CC y PMP respectivamente) (Forsythe, 1980). La textura del suelo se obtuvo con el método del hidrómetro y calibrado por temperatura (Burt, 2014). La estabilidad de agregados se determinó con el método de tamizado en húmedo (Kemper & Rosenau, 1986), utilizando un Wet sieving apparatus® (Royal Eijkelkamp, 2024).

El análisis de los nutrientes en tejido foliar se realizó en el laboratorio químico de CORBANA, a través de digestión en microondas y determinación en ICP/OES (Sparks, 1996), mientras que el nitrógeno se obtuvo por combustión seca (Elementar Analysensysteme GmbH, 2011). El conteo de las poblaciones de nemátodos fitoparásitos y saprofitos en la raíz se realizó en el laboratorio de Nematología de CDADM (Araya, 2002).

El carbono de la biomasa y respiración microbiana se determinaron utilizando la metodología descrita por Vance et al. (1987) y Anderson (1982), respectivamente. La actividad enzimática de la Deshidrogenasa y la β -glucosidasa, de acuerdo con la metodología descrita por Henríquez et al. (2014). Estos indicadores se determinaron en el Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. La huella metabólica de la comunidad microbiana sobre sustratos de carbono se determinó con Biolog®EcoPlate™ (Biolog Inc. USA) (Luan et al., 2020), en el Centro de Investigación en Biología Celular y Molecular de la Universidad de Costa Rica. El metabolismo microbiano de cada sustrato se expresó como desarrollo promedio del color del pozo (AWCD por sus siglas en inglés) a las 72 h, leído como absorbancia a una longitud de onda de 590 nm con BIOLOG-Microstation™. A partir de AWCD se calculó el índice de diversidad de Shannon (H'), el índice de riqueza de Simpson (S), y la similitud (E), relacionados con la cantidad de sustratos de carbono que la comunidad puede degradar. Para la determinación de S se utilizó el total de pozos con una densidad óptica ≥ 0.250 (Chou et al., 2017).

Evaluación de la calidad del suelo

La evaluación de la calidad del suelo se realizó siguiendo tres pasos básicos: selección de indicadores de la calidad del suelo (ICS), interpretación de esos indicadores, e integración en índices de la calidad del suelo (InCS) (Figura 3.2). Sin embargo, los ICS

fueron preseleccionados seleccionados por su relación con las funciones del suelo, sensibilidad al manejo y relevancia para el cultivo (Bünemann et al., 2018; Karlen et al., 1997; Seybold et al., 2018) (Anexo 1). Posteriormente, se conformaron tres conjuntos de indicadores: uno que utiliza el total (TDS), conformado por 51 indicadores; uno reducido por análisis de componentes principales (MDS_{PCA}), conformado por un mínimo de siete y un máximo de 19 indicadores; y el último, reducido por criterio de expertos y revisión de literatura (MDS_{EO}), conformado por un mínimo de seis y un máximo de 13 indicadores.

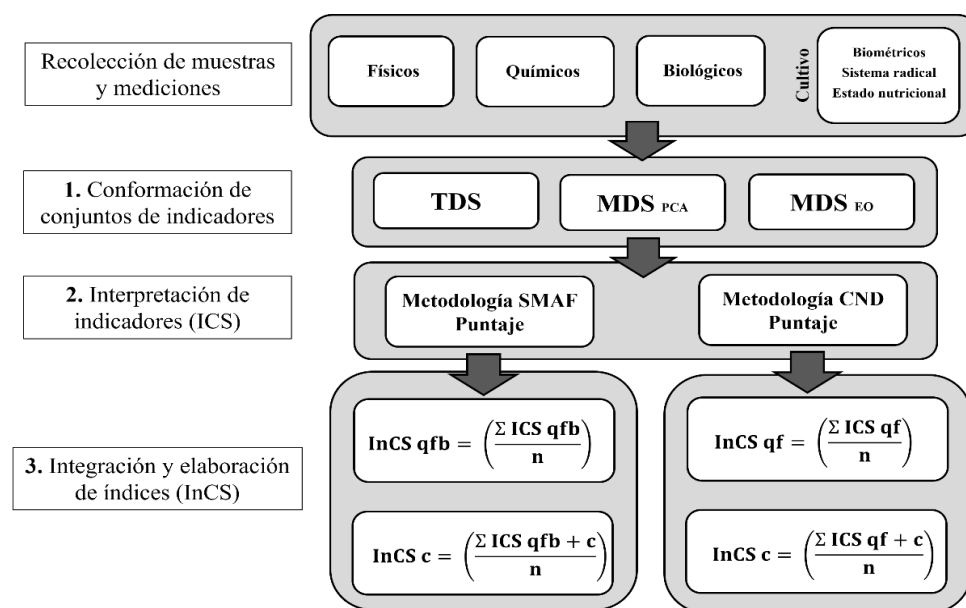


Figura 3.2. Esquema utilizado para obtener los índices de calidad de suelo en un bosque (BM) y dos condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP) (Andrews et al. 2004). ICS: indicadores de la calidad del suelo. InCS: índice de calidad del suelo. SMAF: Marco de evaluación del manejo de suelos - Método de evaluación cuantitativa de la calidad del suelo. CND: Distribución Normal Acumulativa. TDS: conjunto total de indicadores. MDS_{PCA}: conjunto de indicadores reducido por análisis de componentes principales. MDS_{EO}: conjunto de indicadores reducido por criterio de expertos y revisión de literatura. InCS_{qfb}: índice de calidad obtenido con indicadores químicos, físicos y biológicos. InCS_{qf}: índice de calidad obtenido con indicadores químicos y físicos. InCS_c: índice de calidad obtenido con indicadores químicos, físicos, biológicos, biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta.

La interpretación de los ICS se realizó mediante dos metodologías: el Marco de evaluación del manejo de suelos (SMAF por sus siglas en inglés) (Andrews et al., 2004), y la Distribución Normal Acumulativa (CND por sus siglas en inglés) (Moebius-Clune et al., 2016). En ambas metodologías, la interpretación de los ICS y la asignación del puntaje a cada uno de ellos se hizo mediante curvas no lineales: "más es mejor" (asíntota superior) descrito en la ecuación 1, "menos es mejor" (asíntota inferior) descrito en la ecuación 2,

o “punto óptimo” (curva Gaussiana) utilizando ambas ecuaciones (Marion et al., 2022) (Cuadro 3.1).

$$\text{Puntaje} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{B-UB}{x-UB}\right)^S\right]} \quad (1)$$

$$\text{Puntaje} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{B-LB}{x-LB}\right)^S\right]} \quad (2)$$

El puntaje es un valor adimensional entre 0 y 1, **a** es el valor máximo del indicador = 1, **B** es el valor base, donde puntaje es 0,5, **LB** es el límite inferior, **UB** es el límite superior, **x** es el valor medido para el indicador de suelo, y **S** es la pendiente de la ecuación que es 2,5. La metodología SMAF consideró los niveles óptimos y límites descritos para los ICS en el cultivo de banano.

Previo a la utilización de la metodología CND, se verificó el comportamiento normal de los ICS disponibles en la base de datos del mapa de suelos de Costa Rica y los registros históricos de CDADM, a través de una prueba de normalidad. En caso contrario se realizó la transformación respectiva, utilizando RStudio versión 2023.12.0.369 (Posit Team, 2023). Posteriormente se seleccionaron los datos correspondientes al orden y suborden de los suelos clasificados para este estudio a una profundidad de 0 a 30 cm. Después de este paso se procedió a obtener la media y la desviación estándar de cada ICS (Cuadro 3.2). Ambas bases de datos contenían datos de ICS químicos, físicos biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta, pero no biológicos.

Finalmente, los ICS fueron integrados por medio de un enfoque aditivo simple, descrito en la ecuación 3 (Marion *et al.* 2022). Donde **InCS** es el índice de calidad de suelo, $\sum_{i=1}^n S_i$ es la sumatoria de los puntajes de los ICS y **n** es el número de ICS. Con la metodología SMAF se obtuvo un InCS_{qfb} que integra los indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo, mientras que con la metodología CND se obtuvo un InCS_{qf} integrando los indicadores químicos y físicos disponibles en las bases de datos e históricos. Con cada una de las metodologías se obtuvo un InCS_c para AP y BP, integrando los indicadores químicos, físicos, biológicos, biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta.

$$\text{InCS} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \right) \quad (3)$$

Cuadro 3.1. Tipo de ecuación utilizada para interpretar y transformar los indicadores a una escala de cero a uno, de acuerdo con la metodología SMAF. (Andrews et al., 2004). LT = umbral inferior. UT = umbral superior. UB = línea de base superior. LB = línea de base inferior. PO= punto óptimo., +EM = "más es mejor", EM = "menos es mejor".

| Variable | Unidad | Ecuación | LT | UT | LB | UB | PO | Referencia |
|-----------|---|----------|------|-------|------|-------|-----|---|
| pH | Sin unidades | PO | 4,9 | 6,55 | 4,5 | 7 | 5.5 | |
| AI | cmol(+) L ⁻¹ | - E M | 0,01 | 2,17 | 0 | 1,5 | - | |
| CE | Ms cm ⁻¹ | - E M | 0,03 | 0,55 | 0 | 4 | - | |
| Na | cmol(+) L ⁻¹ | - E M | 0,01 | 0,45 | 0 | 8,7 | - | |
| Ca | cmol(+) L ⁻¹ | + E M | 1,77 | 14,1 | 5 | 20 | - | |
| Mg | cmol(+) L ⁻¹ | + E M | 0,64 | 6,66 | 2 | 10 | - | |
| K | cmol(+) L ⁻¹ | + E M | 0,13 | 3,15 | 0,5 | 1,5 | - | López y Espinoza (1995), y Martin-Prével et al. (1988) |
| P | mg L ⁻¹ | + E M | 1 | 72 | 19 | 40 | - | |
| Cu | mg L ⁻¹ | + E M | 0,9 | 13,9 | 1 | 5 | - | |
| Zn | mg L ⁻¹ | + E M | 0,1 | 19,9 | 1 | 6 | - | |
| B | mg L ⁻¹ | + E M | 0,01 | 1,11 | 0,2 | 1 | - | |
| Fe | mg L ⁻¹ | PO | 67 | 373 | 50 | 150 | 100 | |
| Mn | mg L ⁻¹ | PO | 6 | 93 | 15 | 50 | 30 | |
| COT | % | + E M | 1,06 | 5,05 | 1 | 3 | - | López y Espinoza (1995). |
| Arena | % | PO | 9 | 70 | 0 | 20 | 35 | |
| Limo | % | PO | 27 | 71 | 40 | 73 | 40 | Jaramillo y Vázquez (1980). |
| Arcilla | % | PO | 2 | 32 | 27 | 40 | 20 | |
| Bd | g cm ⁻³ | - E M | 0,4 | 1,1 | 0,6 | 1,5 | - | |
| RSP | MPa | - E M | 0,4 | 1,3 | 0 | 1,3 | - | Vaquero (2005). |
| RSSP | MPa | - E M | 0,7 | 2,3 | 0 | 1,3 | - | |
| Est.Agreg | % | + E M | 47 | 96 | 30 | 100 | - | Andrews et al. (2004). |
| AD | % HV | PO | 2,8 | 64,1 | - | - | 20 | Turner et al. (2007), van Wesemael et al. (2019), y Zapata et al. (2017). |
| RM | mg CO ₂ kg ⁻¹ | + E M | 15 | 291 | 20 | 200 | - | |
| CBM | mg C kg ⁻¹ | + E M | 47 | 511 | 80 | 500 | - | Anderson (1982), Vance et al. (1987). |
| AEDh | µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹ | + E M | 0.10 | 81.7 | NR | NR | - | |
| AEBg | µg PNP g ⁻¹ h ⁻¹ | + E M | 0.08 | 0.10 | NR | NR | - | Henríquez et al. (2014) |
| AWCD | OD 590 nm | + E M | 0,07 | 1,45 | 0,07 | 1,45 | - | |
| DIV (H) | Sin unidades | + E M | 2,1 | 3,33 | 2,1 | 3,33 | - | |
| RIQ (S) | Sin unidades | + E M | 3 | 29 | 3 | 29 | - | Luan et al. (2020), Chou et al. (2017) |
| SIM (E) | Sin unidades | + E M | 0,97 | 1,91 | 0,97 | 1,91 | - | |
| RF | g planta ⁻¹ | + E M | 17 | 173 | 20 | 150 | - | Turner y Rosales (2005). |
| Rsimilis | indiv/100 g | - E M | 3000 | 16000 | 0 | 10000 | - | Araya (2002) y Vargas y Araya (2018). |
| NemSap | indiv/100 g | + E M | 0 | 2500 | NR | NR | - | |
| N | % ebms | + E M | 2,51 | 3,2 | 2,48 | 2,6 | - | |
| P | % ebms | + E M | 0,16 | 0,25 | 0,14 | 0,21 | - | |
| Ca | % ebms | + E M | 0,21 | 0,77 | 0,48 | 1 | - | |
| Mg | % ebms | + E M | 0,24 | 0,37 | 0,21 | 0,36 | - | |
| K | % ebms | + E M | 2,43 | 4,32 | 2,85 | 4 | - | |
| S | % ebms | + E M | 0,16 | 0,23 | 0,15 | 0,3 | - | López et al. (2008), López y Espinoza (1995) y Martin-Prével et al. (1988). |
| Cu | mg kg ⁻¹ | + E M | 7,3 | 11,4 | 4,8 | 14 | - | |
| Fe | mg kg ⁻¹ | + E M | 47 | 118 | 57 | 100 | - | |
| Zn | mg kg ⁻¹ | + E M | 14 | 30 | 14 | 27 | - | |
| B | mg kg ⁻¹ | + E M | 10 | 21 | 10 | 20 | - | |
| Mn | mg kg ⁻¹ | + E M | 81 | 321 | 57 | 150 | - | |
| APC | cm | + E M | 160 | 310 | 150 | 350 | - | |
| CPC | cm | + E M | 68 | 95 | | 90 | - | |
| HPC | hojas/planta | + E M | 4 | 9 | | 9 | - | |
| APF | cm | + E M | 120 | 285 | | 250 | - | González (2021), Serrano et al. (2006), y Villarreal (2013). |
| CPF | cm | + E M | 66 | 96 | | 90 | - | |
| HPF | hojas/planta | + E M | 10 | 13 | | 15 | - | |
| MPR | manos/racimo | + E M | 6 | 9 | 5 | 9 | - | |

NR: no registra. AI: acidez intercambiable. CE: conductividad eléctrica. Na: sodio. Ca: calcio. Mg: magnesio. N: nitrógeno. K: potasio. P: fósforo. Cu: cobre. Zn: zinc. B: boro. Fe: hierro. Mn: manganeso. COT: carbono orgánico total. Bd: densidad aparente. RSP: Resistencia a la penetración superficial. RSSP: Resistencia a la penetración subsuperficial. Agreg.Est: Estabilidad de agregados. AD: agua disponible. % HV: porcentaje de humedad volumétrica. RM: Respiración microbiana. CBM: Carbono de la biomasa microbiana. AWCD: Desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). DIV(H'): Índice Shannon-Wiener. DIV(S): Índice de Simpson. SIM: Similitud. RF: raíz funcional. *R.similis*: *Radopholus similis*. NemSap: nematodos saprófitos. %ebms: porcentaje en base materia seca. APC: Altura de hijo edad cosecha. CPC: Circunferencia de planta edad cosecha. HPC: Hojas por planta edad cosecha. APF: Altura de hijo edad floración. CPF: Circunferencia de planta edad floración. HPF: Hojas por planta edad floración. MPR: Manos por racimo.

Cuadro 3.2. Indicadores y tipo de curva utilizada para interpretar y transformar a una escala de cero a uno, de acuerdo con la metodología CND (Moebius-Clune, 2016). AVE. = promedio. ST. DV.: Desviación estándar. LT: umbral inferior. UT: umbral superior. PO: punto óptimo., +EM: "más es mejor", EM: "menos es mejor". *Datos disponibles en la base de datos e históricos.

| Variable | Unidad | Ecuación | AVE. | ST.DV. | LT | UT | PO | Entradas* | Base de datos |
|----------|-------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|-----|-----------|---------------|
| pH | Sin unidades | PO | 5,3 | 0,5 | 3,9 | 7,6 | 5,5 | 2428 | CDDADM y MSCR |
| AI | cmol(+) L ⁻¹ | - E M | 1,0 | 0,9 | 0,1 | 5,0 | - | 2096 | CDDADM y MSCR |
| Ca | cmol(+) L ⁻¹ | + E M | 8,4 | 3,4 | 0,3 | 36,0 | - | 2248 | CDDADM y MSCR |
| Mg | cmol(+) L ⁻¹ | + E M | 3,0 | 1,3 | 0,0 | 8,6 | - | 2248 | CDDADM y MSCR |
| K | cmol(+) L ⁻¹ | + E M | 1,4 | 0,7 | 0,1 | 4,6 | - | 2248 | CDDADM y MSCR |
| P | mg L ⁻¹ | + E M | 33,8 | 20,3 | 1,0 | 181,0 | - | 2248 | CDDADM y MSCR |
| Cu | mg L ⁻¹ | + E M | 7,9 | 5,9 | 0,6 | 53,6 | - | 2238 | CDDADM y MSCR |
| Zn | mg L ⁻¹ | + E M | 5,6 | 3,7 | 0,0 | 40,7 | - | 2248 | CDDADM y MSCR |
| B | mg L ⁻¹ | + E M | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 2,8 | - | 788 | CDDADM y MSCR |
| Fe | mg L ⁻¹ | PO | 266 | 190 | 28 | 2564 | 100 | 2248 | CDDADM y MSCR |
| Mn | mg L ⁻¹ | PO | 37 | 29 | 1 | 268 | 30 | 2235 | CDDADM y MSCR |
| COT | % | + E M | 3,7 | 1,3 | 0,9 | 10,1 | - | 180 | CDDADM y MSCR |
| Arena | % | PO | 42,5 | 17,1 | 6,0 | 85,0 | 35 | 226 | MSCR |
| Limo | % | PO | 22,2 | 10,9 | 7,0 | 60,4 | 40 | 226 | MSCR |
| Arcilla | % | PO | 37,0 | 17,1 | 5,0 | 72,0 | 20 | 226 | MSCR |
| Bd | g cm ⁻³ | - E M | 0,9 | 0,4 | 0,0 | 2,2 | - | 268 | MSCR |
| RSP | MPa | - E M | 0,5 | 0,3 | 0,0 | 1,5 | - | 407 | MSCR |
| AD | % HV | PO | 10,7 | 3,2 | 1,0 | 28,0 | 20 | 179 | MSCR |
| RF | g/planta | + E M | 36,2 | 19,9 | 2,3 | 196,0 | - | 5877 | CDDADM |
| Rsimilis | indiv/100 g | - E M | 9811 | 9032 | 167 | 60000 | - | 5789 | CDDADM |
| N | % ebms | + E M | 2,77 | 0,28 | 2,03 | 3,56 | - | 673 | CDDADM |
| P | % ebms | + E M | 0,19 | 0,02 | 0,14 | 0,28 | - | 673 | CDDADM |
| Ca | % ebms | + E M | 3,50 | 0,32 | 2,46 | 4,64 | - | 673 | CDDADM |
| Mg | % ebms | + E M | 0,51 | 0,10 | 0,11 | 0,83 | - | 673 | CDDADM |
| K | % ebms | + E M | 0,27 | 0,03 | 0,15 | 0,40 | - | 673 | CDDADM |
| Zn | mg kg ⁻¹ | + E M | 21,58 | 5,26 | 12,20 | 67,00 | - | 673 | CDDADM |
| B | mg kg ⁻¹ | + E M | 12,63 | 5,14 | 2,00 | 42,35 | - | 673 | CDDADM |
| APC | cm | + E M | 79,43 | 8,20 | 61,00 | 97,00 | - | 164 | CDDADM |
| CPC | cm | + E M | 249,20 | 55,71 | 100,00 | 410,00 | - | 164 | CDDADM |
| HPC | hojas/planta | + E M | 8,96 | 2,10 | 4,00 | 13,00 | - | 164 | CDDADM |
| APF | cm | + E M | 78,80 | 7,59 | 59,00 | 97,00 | - | 164 | CDDADM |
| CPF | cm | + E M | 195,99 | 60,96 | 75,00 | 420,00 | - | 164 | CDDADM |
| HPF | hojas/planta | + E M | 13,01 | 1,58 | 10,00 | 16,00 | - | 164 | CDDADM |
| MPR | manos/racimo | + E M | 7,63 | 0,93 | 6,00 | 10,00 | - | 164 | CDDADM |

AI: acidez intercambiable. Ca: calcio. Mg: magnesio. N: nitrógeno. K: potasio. P: fósforo. Cu: cobre. Zn: zinc. B: boro. Fe: hierro. Mn: manganeso. COT: carbono orgánico total. Bd: densidad aparente. RSP: Resistencia a la penetración superficial. AD: agua disponible. % HV: porcentaje de humedad volumétrica. RF: raíz funcional. *R.similis*: *Radopholus similis*. % ebms: porcentaje en base materia seca. APC: Altura de hijo edad cosecha. CPC: Circunferencia de planta edad cosecha. HPC: Hojas por planta edad cosecha. APF: Altura de hijo edad floración. CPF: Circunferencia de planta edad floración. HPF: Hojas por planta edad floración. MPR: Manos por racimo. CDDADM: Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte S.A. MSCR: Mapa de suelos de Costa Rica.

Análisis estadístico

Se determinaron los estadísticos descriptivos como la media, desviación estándar y varianza para los ICS. Posteriormente se realizó una comprobación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Cuando estos supuestos se cumplieron, se procedió con un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, con RStudio versión 2023.12.0.369 (Posit Team, 2023) y con una significancia estadística determinada en $p \leq 0,05$. En caso contrario se realizó la transformación respectiva. Cuando hubo significancia estadística se realizó una prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Para la elaboración del conjunto de indicadores reducido

(MDS_{PCA}) se realizó un análisis multivariado (PCA) utilizando los componentes principales (CP) que explicaron el 80% de la variación observada y con autovalores >1. Posteriormente, a partir de una rotación tipo varimax realizada a los CP, se retuvo los indicadores con cargas factoriales $\geq 0,45$. Además, se realizó una matriz de correlaciones de Pearson para discriminar indicadores correlacionados (Anexos 2 y 3), en cuyo caso se seleccionó el de mayor carga factorial.

RESULTADOS

Análisis e interpretación de indicadores físicos, químicos y biológicos

Los resultados de los análisis permitieron clasificar el suelo en la condición BP como Franco Arcillo Limoso, y en la condición AP como Franco Arenoso, mientras que el suelo de BM se clasificó como Franco Limoso (Anexo 4). La estabilidad de agregados en los sitios BP y BM fue superior a la de AP (Cuadro 3.3). La resistencia del suelo a la penetración (RSSP) fue mayor en BP que en AP, y superior en comparación con BM. En BP hasta los 100 cm de profundidad predominaron condiciones de compactación (Figura 3.3a) que coinciden con la presencia de raíces muertas y con secciones necrosadas a esa profundidad. Por otro lado, en términos absolutos, el agua disponible (AD) fue mayor en BM y AP, en comparación con BP (Cuadro 3.3 y Figura 3.3 b).

Con respecto a los parámetros químicos relacionados con la acidez, el pH en BP fue menor que el encontrado en BM y AP, mientras que la acidez intercambiable fue estadísticamente igual en los tres sitios, pero con un valor promedio de más del doble en BP. En cuanto a las concentraciones de macro y micronutrientes, los suelos en BP tuvieron concentraciones mucho mayores que AP; no obstante, la condición AP tuvo concentraciones mayores en comparación con BM (Cuadro 3.3). La capacidad de intercambio catiónica (CIC), en promedio fue mayor en BP que en AP y BP ($17.9 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ y $11.0 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ respectivamente), mientras que en BM fue de $8.7 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$. En los tres sitios la CIC disminuyó con la profundidad (Figura 3.4a), no obstante, la disminución en BP fue inferior que en los otros dos sitios. Los suelos de BM y AP presentaron el mayor porcentaje de carbono orgánico total (COT) que BP en el horizonte superficial del suelo

(Figura 3.4b y Cuadro 3.3). A mayores profundidades del suelo, el COT disminuyó muy poco y de manera similar en los tres sitios (Figura 3.4b).

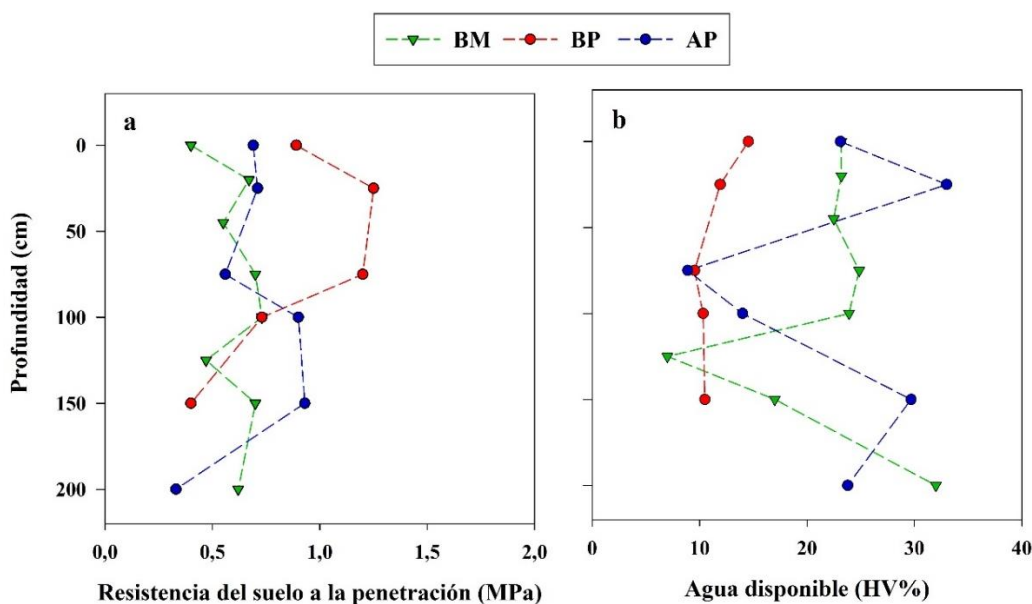


Figura 3.3. Variación de la resistencia del suelo a la penetración (a) y agua disponible (b) a distintas profundidades en fosas de observación realizadas en un bosque (BM) y en dos condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP).

La conductividad eléctrica fue muy superior en las condiciones de BP y AP, cercana a 0.20 mScm^{-1} , mientras que en BM fue de 0.04 mScm^{-1} . Por el contrario, en BM, el contenido de sodio fue casi el doble (0.70 mgL^{-1}) al registrado en los suelos BP y AP. Las concentraciones de Fe y Mn fueron mayores en BP (Cuadro 3.3) de 0 a 100 cm de profundidad (Figura 3.4c y 3.4d), lo que coincide con la abundancia de características redoximórficas en la fosa de observación realizada en este sitio (Figura 2.4).

Al respecto de los indicadores biológicos, el desarrollo de color promedio en cada pozo (AWCD), en los Biolog®EcoPlate™, fue mayor en el suelo de BM seguida por AP y con el valor menor la condición BP (Cuadro 1). La diversidad funcional (H' ; índice Shannon-Wiener) y la riqueza (S ; índice Simpson) respecto a la cantidad de compuestos de carbono que la comunidad microbiana puede utilizar, igualmente muestran valores superiores en BM que en BP y AP. También, el carbono de la biomasa microbiana (CBM) fue considerablemente mayor en BM, en comparación con AP y BP, y entre estas dos no hubo diferencias, Por el contrario, el valor de similitud E no mostró diferencias entre los sitios (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo en un bosque maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP).

| Indicador | BM | BP | AP |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Físicos | | | |
| % Arena | 44,4 ± 11,4 a | 15,8 ± 6,2 b | 47,7 ± 9,9 a |
| % Limo | 51,0 ± 10,6 b | 62,52 ± 5,23 a | 46,16 ± 6,18 b |
| % Arcilla | 4,6 ± 1,8 b | 21,7 ± 5,2 a | 6,2 ± 5,0 b |
| % Est. Agreg. | 90,3 ± 5,4 a | 88,2 ± 7,1 a | 70,1 ± 10,2 b |
| RSP (MPa) 0-30 cm (40 % HG) | 0,55 ± 0,12 c | 1,01 ± 0,11 a | 0,92 ± 0,16 b |
| RSSP (MPa) 30-50 cm (55 % HG) | 1,29 ± 0,49 a | 1,23 ± 0,27 a | 1,33 ± 0,17 a |
| Bd (g cm ⁻³) | 0,58 ± 0,11 b | 0,86 ± 0,09 a | 0,90 ± 0,09 a |
| AD (% HV) | 15,1 ± 5,9 ab | 13,5 ± 10,1 b | 17,4 ± 14,6 a |
| Químicos | | | |
| AI (cmol (+) L ⁻¹) | 0,17 ± 0,09 a | 0,43 ± 0,62 a | 0,17 ± 0,20 a |
| pH | 5,89 ± 0,25 a | 5,64 ± 0,46 b | 5,88 ± 0,40 a |
| COT (%) | 2,71 ± 0,92 a | 2,13 ± 0,46 b | 2,40 ± 1,07 ab |
| Ca (cmol (+) L ⁻¹) | 5,53 ± 2,23 b | 10,84 ± 2,26 a | 6,76 ± 2,35 b |
| Mg (cmol (+) L ⁻¹) | 2,33 ± 1,12 b | 5,26 ± 1,02 a | 2,99 ± 1,34 b |
| K (cmol (+) L ⁻¹) | 0,31 ± 0,10 b | 1,18 ± 0,66 a | 0,97 ± 0,43 a |
| Na (cmol (+) L ⁻¹) | 0,31 ± 0,02 a | 0,15 ± 0,04 b | 0,13 ± 0,05 b |
| CE (mS cm ⁻¹) | 0,04 ± 0,01 b | 0,19 ± 0,13 a | 0,21 ± 0,10 a |
| P (mg L ⁻¹) | 5,2 ± 2,60 c | 36,4 ± 21,5 a | 17,1 ± 15,9 b |
| Fe (mg L ⁻¹) | 149,3 ± 61,6 b | 268,9 ± 65,6 a | 129,0 ± 66,9 b |
| Cu (mg L ⁻¹) | 2,46 ± 1,14 b | 9,18 ± 2,48 a | 2,62 ± 0,92 b |
| Zn (mg L ⁻¹) | 1,22 ± 0,80 c | 8,64 ± 4,58 a | 5,59 ± 4,01 b |
| Mn (mg L ⁻¹) | 24,8 ± 20,7 b | 38,9 ± 16,9 a | 21,1 ± 16,1 b |
| B (mg L ⁻¹) | 0,08 ± 0,03 c | 0,31 ± 0,24 b | 0,50 ± 0,26 a |
| Biológicos | | | |
| AWCD | 0,82 ± 0,33 a | 0,44 ± 0,28 b | 0,63 ± 0,32 ab |
| DIV (H') | 3,07 ± 0,16 a | 2,73 ± 0,21 b | 2,86 ± 0,24 b |
| RIQ (S) | 21,36 ± 5,02 a | 13,80 ± 4,57 b | 17,04 ± 5,52 b |
| SIM (E) | 1,02 ± 0,09 a | 1,07 ± 0,09 a | 1,06 ± 0,18 a |
| RM (mg C-CO ₂ g ⁻¹ día) | 78,2 ± 33,9 a | 70,0 ± 44,9 a | 111,3 ± 70,4 a |
| CBM (µg C kg ⁻¹ suelo ⁻¹) | 306,7 ± 86,9 a | 141,8 ± 60,8 b | 142,1 ± 37,1 b |
| AEBg (µg PNP g ⁻¹ h ⁻¹)* | 0,092 ± 0,003 a | 0,085 ± 0,001 b | 0,094 ± 0,004 a |
| AEDh (µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹)* | 15,5 ± 7,4 b | 3,6 ± 3,52 a | 44,5 ± 23,55 c |

Promedios ± desviación estándar de la media (n=25). *n = 15. Promedios seguidos de una letra distinta en una misma línea son estadísticamente diferentes según una prueba de Tukey (p≤0.05). Est. Agreg: estabilidad de agregados. RSP: resistencia a la penetración superficial. RSSP: resistencia a la penetración subsuperficial. Bd: densidad aparente. AD: agua disponible. %HV: porcentaje de humedad volumétrica. AI: acidez intercambiable. COT: carbono orgánico total. Ca: calcio. Mg: magnesio. K: potasio. CE: conductividad eléctrica. P: fósforo. Fe: hierro. Cu: cobre. Zn: zinc. Mn: manganeso. B: boro. Na: sodio. AWCD: desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). DIV (H'): índice Shannon-Wiener. RIQ(S): riqueza, índice de Simpson. SIM (E): similitud. RM: respiración microbiana. CBM: carbono de la biomasa microbiana. AEDh: Actividad enzimática de Deshidrogenasa. AEBg: Actividad enzimática de β-glucosidasa.

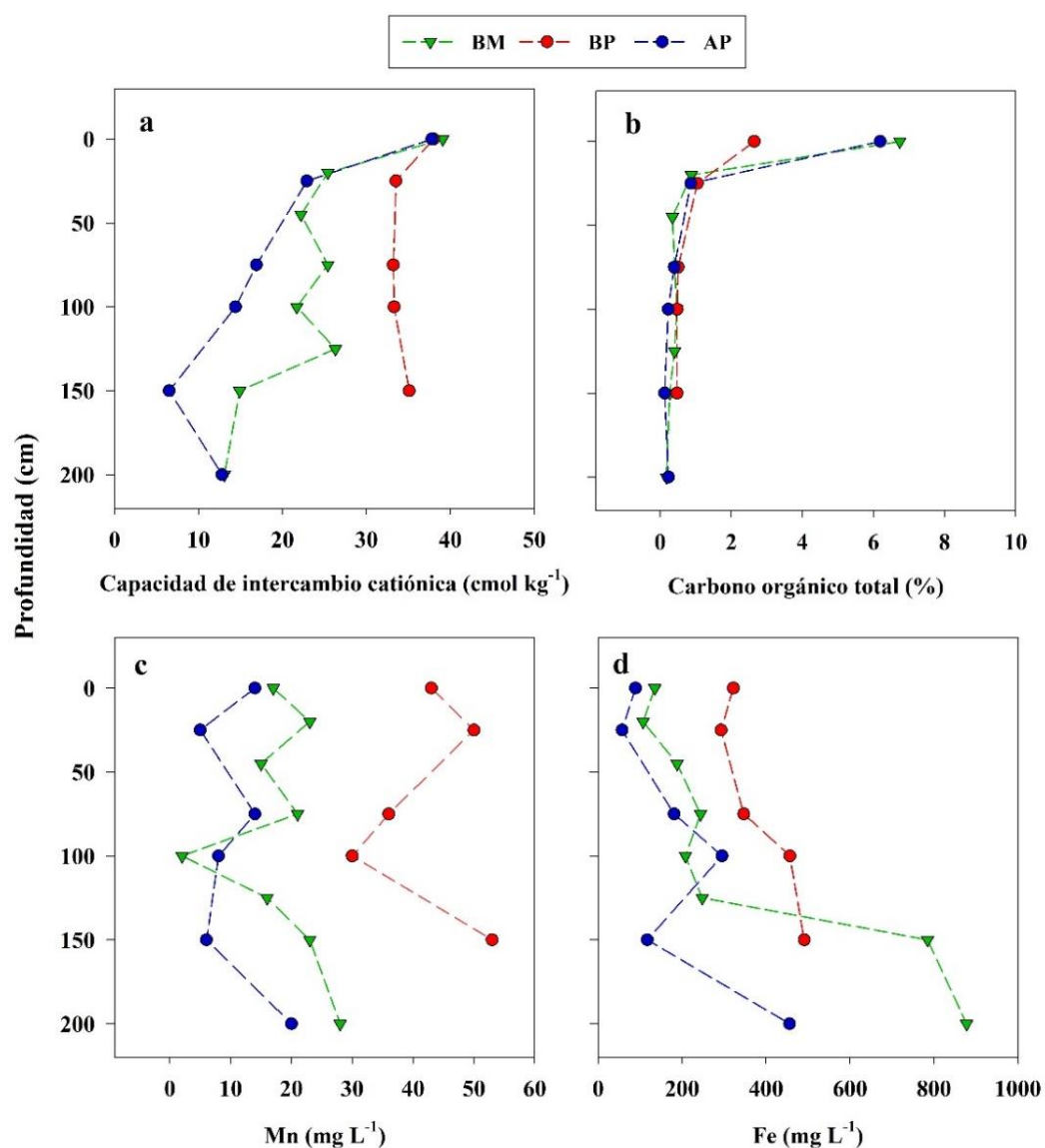


Figura 3.4. Variación de la capacidad de intercambio catiónica (a), carbono orgánico total (b), concentración de Fe (c) y Mn (d) a distintas profundidades en fosas de observación realizadas en un bosque (BM) y en dos condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP).

La respiración microbiana (RM) fue superior en la condición de AP, en comparación con BM y la condición de BP, sin diferencias estadísticas significativas. De igual manera, la actividad enzimática de la enzima deshidrogenasa (AEDh) fue superior en la condición de AP, y en este caso, la diferencia con la condición de BP y BM fue estadísticamente significativa (Cuadro 3.3). No hubo diferencias en la actividad de la enzima β -glucosidasa (AEBg) entre BM y AP, pero sí entre estas condiciones y BP, teniendo BP el valor más bajo (Cuadro 3.3).

En general, los indicadores físicos, textura y las tres fracciones que la componen, AD, RSSP y Bd, además del pH, AI y COT obtuvieron mejores puntajes en la condición de AP y BM, con las dos metodologías utilizadas, SMAF y CND. Con respecto a la fertilidad química, las concentraciones de Ca, Mg, K, P, Zn y Cu mostraron los mayores puntajes en la condición BP, con ambas metodologías. Sin embargo, en la condición AP las concentraciones de Fe y Mn obtuvieron mayores puntajes, en comparación con la condición BP. Con respecto al AWCD, Riqueza, Diversidad funcional, CBM, RM, AEBg y AEDh se obtuvieron mayores puntajes en BM y la condición AP (Figura 3.5).

Análisis e interpretación de indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta

Los resultados de este estudio demostraron que la circunferencia de la planta en edad de floración (CPF) y de cosecha (CPC) medida a 1,0 m de altura de la base, hojas por planta en edad de floración (HPF), altura del hijo en edad de cosecha (APC) y la cantidad de manos por racimo (MPR) fueron mayores en la condición de AP en comparación con BP (Cuadro 3.4), mientras que en las variables altura del hijo a floración (APF) y hojas a cosecha (HPC) no hubo diferencias entre condiciones evaluadas.

La raíz funcional (RF), las poblaciones de *R. similis* y nemátodos saprofitos (Nem. Sap.) no mostraron diferencias entre las condiciones evaluadas. Con respecto a la nutrición del cultivo, las concentraciones de Ca, Mg, Mn, Zn y Cu a nivel foliar fueron significativamente más altas en BP que en AP (Cuadro 3.4). Respecto al resto de nutrientes no hubo diferencias estadísticas entre los sitios BP y AP.

El puntaje asignado a los indicadores biométricos y del sistema radical, tanto con la metodología SMAF como CND fueron mayores en la condición de AP que en BP, no obstante, los indicadores del estado nutricional de la planta tuvieron mejores puntajes en la condición BP que en la condición AP (Figura 3.6).

Cuadro 3.4. Indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta en dos condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP).

| Indicador | BP | AP |
|---|-----------------|----------------|
| Biométricos | | |
| CPF (cm) | 75,9 ± 5,7 b | 86,1 ± 6,1 a |
| APF (cm) | 184,2 ± 35,9 a | 200,4 ± 32,4 a |
| HPF | 10,7 ± 0,7 b | 11,8 ± 0,7 a |
| CPC (cm) | 77,9 ± 5,3 b | 86,1 ± 6,4 a |
| APC (cm) | 242,2 ± 37,1 b | 265,8 ± 22,8 a |
| HPC | 6,2 ± 1,3 a | 6,7 ± 1,2 a |
| MPR | 7,5 ± 0,4 b | 8,2 ± 0,9 a |
| Sistema radical de la planta | | |
| RF (g planta ⁻¹) | 67 ± 36 a | 62 ± 29 a |
| <i>R.similis</i> (indiv 100 g ⁻¹) | 10 060 ± 2513 a | 9 190 ± 3013 a |
| Nem.Sap (indiv100 g ⁻¹) | 60 ± 208 a | 260 ± 557 a |
| Estado nutricional de la planta | | |
| N (% ebms) | 2,85 ± 0,14 a | 2,86 ± 0,18 a |
| P (% ebms) | 0,19 ± 0,015 a | 0,18 ± 0,011 a |
| K (% ebms) | 3,47 ± 0,32 a | 3,53 ± 0,41 a |
| Ca (% ebms) | 0,60 ± 0,12 a | 0,53 ± 0,07 b |
| Mg (% ebms) | 0,30 ± 0,03 a | 0,28 ± 0,03 b |
| S (% ebms) | 0,19 ± 0,01 a | 0,19 ± 0,01 a |
| Fe (mg kg ⁻¹) | 70,1 ± 14,0 a | 64,3 ± 10,9 a |
| Mn (mg kg ⁻¹) | 188,2 ± 59,6 a | 126,5 ± 27,2 b |
| Zn (mg kg ⁻¹) | 19,6 ± 3,8 a | 17,7 ± 1,9 b |
| Cu (mg kg ⁻¹) | 9,30 ± 0,92 a | 8,89 ± 0,95 b |
| B (mg kg ⁻¹) | 12,8 ± 2,2 a | 12,8 ± 1,1 a |

Promedios ± desviación estándar de la media (n=25). Promedios seguidos de una letra distinta en una misma línea son estadísticamente diferentes según una prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). APF: Altura de hijo edad floración. CPF: Circunferencia de planta edad floración. HPF: Hojas por planta edad floración. APC: Altura de hijo edad cosecha. CPC: Circunferencia de planta edad cosecha. HPC: Hojas por planta edad cosecha. MPR: Manos por racimo. RF: raíz funcional. *R.similis* : *Radopholus similis*. NemSap: nematodos saprófitos. %ebms: porcentaje en base materia seca. N: nitrógeno. P: fósforo. K: potasio. Ca: calcio. Mg: magnesio. S: azufre. Fe: hierro. Mn: manganeso. Zn: zinc. Cu: cobre. B: boro.

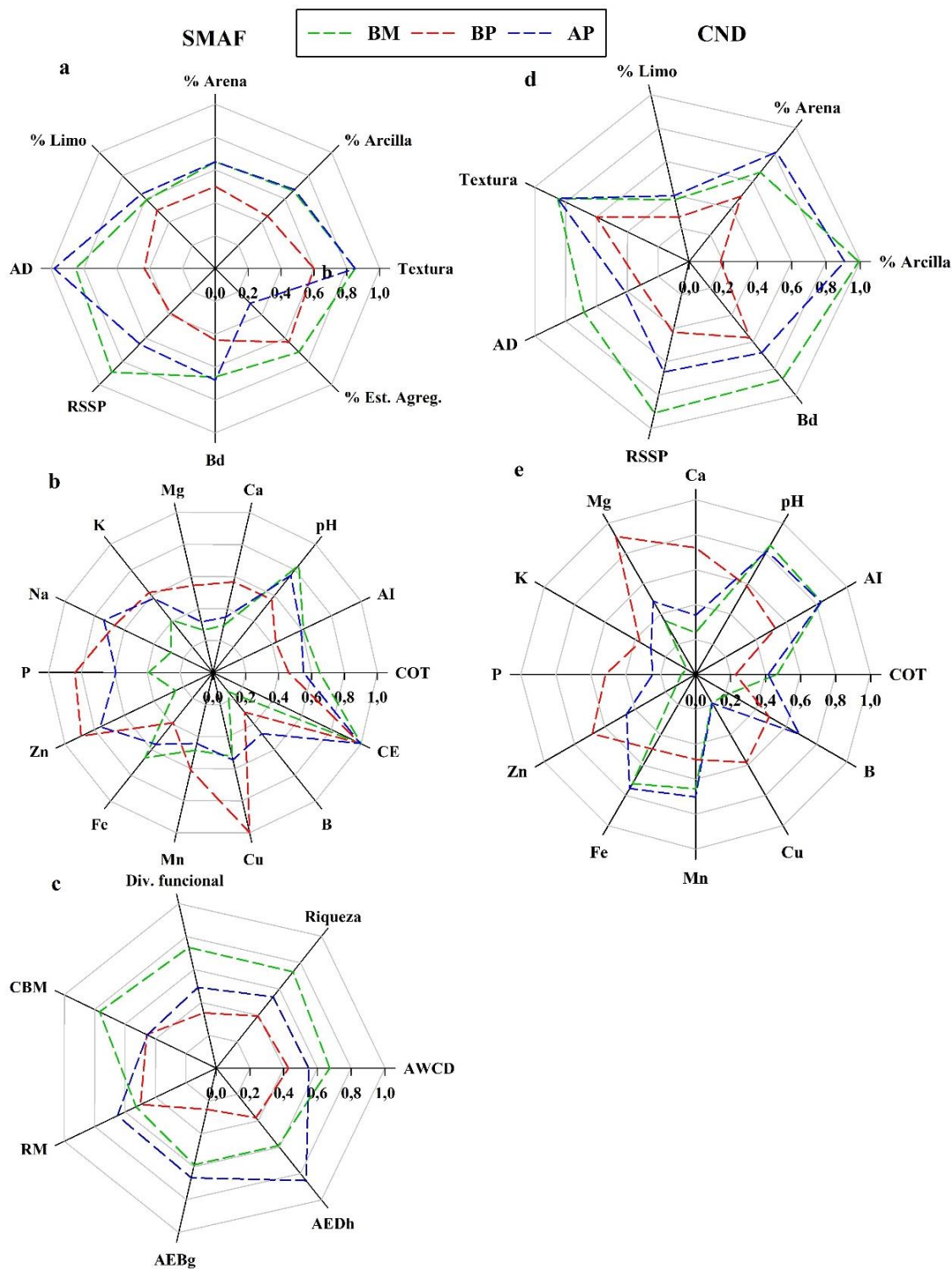


Figura 3.5. Puntaje, en escala de 0 a 1, asignado a los indicadores físicos (a y d), químicos (b y e) y biológicos (c) con las metodologías SMAF y CND en un bosque secundario maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP). Est. Agreg: estabilidad de agregados. RSSP: resistencia a la penetración subsuperficial. Bd: densidad aparente. AD: agua disponible. %HV: porcentaje de humedad volumétrica. AI: acidez intercambiable. COT: carbono orgánico total. AWCD: desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). RM: respiración microbiana. CBM: carbono de la biomasa microbiana. AEDh: Actividad enzimática de Deshidrogenasa. AEBg: Actividad enzimática de β -glucosidasa.

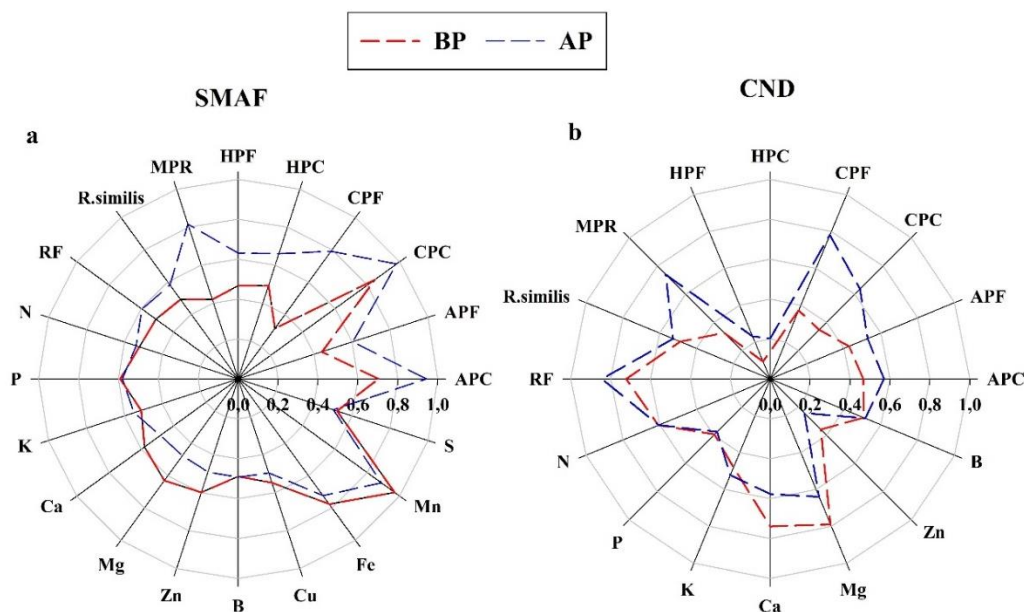


Figura 3.6. Puntaje, en escala de 0 a 1, asignado a los indicadores del cultivo con las metodologías SMAF (a) y CND (b) en condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP). APF: Altura de hijo edad floración. CPF: Circunferencia de planta edad floración. HPF: Hojas por planta edad floración. APC: Altura de hijo edad cosecha. CPC: Circunferencia de planta edad cosecha. HPC: Hojas por planta edad cosecha. MPR: Manos por racimo. RF: raíz funcional. *R.simililis* : *Radopholus similis*. N: nitrógeno. P: fósforo. K: potasio. Ca: calcio. Mg: magnesio. S: azufre. Fe: hierro. Mn: manganeso. Zn: zinc. Cu: cobre. B: boro.

Evaluación de la calidad de suelo

Las dos metodologías para la interpretación de indicadores (SMAF y CND) y tres clases de indicadores de la calidad del suelo, químicos, físicos y biológicos, sirvieron de base para obtener los diferentes conjuntos de indicadores de la calidad de suelo. Como se describió anteriormente en este capítulo, el primer conjunto estuvo conformado por el total de los 51 indicadores (TDS); el segundo, obtenido por medio del análisis de componentes principales (MDS_{PCA}) (Anexos 5 y 6), generó cuatro componentes principales que acumularon el 80% de la variación y los indicadores con cargas factoriales ≥ 0.45 (Cuadro 3.5 y 3.6), lo que redujo el conjunto inicial a siete y 19 indicadores y, por último, el criterio de expertos y revisión de literatura (MDS_{EO}) redujo a seis y 13 indicadores (Cuadro 3.7). De los 20 indicadores del Cuadro 3.5 y 12 indicadores de Cuadro 3.6, con cargas factoriales ≥ 0.45 , se eliminaron 8 y 5 indicadores respectivamente.

Con respecto a los indicadores que conformaron los conjuntos reducidos, se observó que el MDS_{EO} seleccionó la AI, textura, CIC e indicadores del cultivo en edad de

floración, mientras que el MDS_{PCA} utilizó el % arena y % de arcilla, concentraciones de K y Na, y variables del cultivo en edad de cosecha y floración (Cuadro 3.7).

Cuadro 3.5. Cargas factoriales en los cuatro componentes principales (CP) de los indicadores químicos, físicos y biológicos. En negrita se muestran las cargas $\geq 0,45$, que se consideraron para conformar el MDS_{PCA}.

| Indicador | CP1* | CP2 | CP3 | CP4 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Químicos | | | | |
| COT (%) | -0,06 | -0,10 | -0,66 | -0,09 |
| pH | 0,05 | 0,00 | 0,65 | 0,12 |
| AI (cmol (+) L ⁻¹) | -0,34 | -0,08 | -0,03 | 0,16 |
| Ca (cmol (+) L ⁻¹) | -0,33 | -0,09 | 0,05 | 0,20 |
| Mg (cmol (+) L ⁻¹) | -0,26 | 0,27 | -0,06 | -0,22 |
| K (cmol (+) L ⁻¹) | 0,14 | -0,51 | -0,07 | 0,33 |
| CE (mS cm ⁻¹) | -0,34 | -0,06 | 0,04 | 0,16 |
| P (mg L ⁻¹) | -0,16 | 0,46 | 0,10 | 0,26 |
| Fe (mg L ⁻¹) | -0,30 | 0,03 | 0,05 | -0,48 |
| Cu (mg L ⁻¹) | -0,30 | -0,28 | 0,15 | -0,08 |
| Zn (mg L ⁻¹) | -0,23 | -0,30 | -0,14 | 0,27 |
| Mn (mg L ⁻¹) | -0,32 | -0,09 | 0,13 | -0,03 |
| B (mg L ⁻¹) | -0,29 | 0,08 | -0,07 | -0,27 |
| Na (mg L ⁻¹) | -0,08 | 0,48 | -0,23 | 0,50 |
| CIC (cmol (+) L ⁻¹) | -0,34 | -0,06 | 0,04 | 0,16 |
| Físicos | | | | |
| Estabilidad de agregados (%) | -0,12 | 0,62 | 0,14 | 0,01 |
| Arena (%) | 0,51 | -0,21 | -0,04 | -0,03 |
| Arcilla (%) | -0,49 | 0,10 | 0,03 | 0,11 |
| Limo (%) | -0,43 | 0,27 | 0,03 | -0,05 |
| Resistencia a la penetración superficial 0-30 cm (MPa) | -0,37 | -0,39 | 0,12 | 0,34 |
| Resistencia a la penetración subsuperficial 30-50 cm (MPa) | 0,06 | -0,17 | 0,93 | 0,14 |
| Agua disponible (% HV) | 0,25 | 0,26 | -0,14 | 0,90 |
| Densidad aparente (g cm ⁻³) | -0,30 | -0,49 | -0,27 | 0,18 |
| Biológicos | | | | |
| AWCD | -0,48 | 0,07 | -0,04 | 0,41 |
| Diversidad H' | -0,50 | -0,02 | -0,05 | 0,21 |
| Riqueza S | -0,52 | 0,01 | -0,07 | 0,23 |
| Similitud E | 0,40 | -0,05 | 0,45 | 0,78 |
| Respiración microbiana (mg C-CO ₂ g ⁻¹ día ⁻¹) | -0,12 | 0,83 | 0,51 | -0,19 |
| Carbono de biomasa microbiana (mg C kg ⁻¹ suelo) | -0,28 | -0,55 | 0,72 | -0,30 |
| β-glucosidasa (μg PNP g ⁻¹ h ⁻¹) | -0,24 | -0,54 | 0,36 | -0,20 |
| Deshidrogenasa (μg INTF g ⁻¹ h ⁻¹) | -0,19 | -0,59 | 0,35 | 0,13 |

*Componentes principales que explicaron más del 80% de la variación observada y cuyos autovaleores fueron >1 .

Cuadro 3.6. Cargas factoriales en los cuatro componentes principales (CP) de los indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta. En negrita se muestran las cargas $\geq 0,45$, que se consideraron para conformar el MDS_{PCA}.

| Indicador | CP1* | CP2 | CP3 | CP4 |
|--|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Biométricos | | | | |
| Circunferencia de planta (cm) edad floración | 0,49 | 0,08 | -0,19 | -0,12 |
| Altura de hijo (cm) edad floración | 0,11 | 0,48 | -0,60 | -0,04 |
| Hojas por planta edad floración | 0,36 | -0,25 | -0,43 | -0,16 |
| Circunferencia de planta (cm) edad cosecha | -0,38 | 0,07 | -0,16 | 0,56 |
| Altura de hijo (cm) edad cosecha | -0,41 | 0,23 | -0,37 | -0,31 |
| Hojas por planta edad cosecha | 0,26 | 0,13 | -0,19 | 0,69 |
| Manos por racimo | -0,48 | -0,06 | -0,26 | -0,08 |
| Sistema radical de la planta | | | | |
| Raíz funcional (g planta ⁻¹) | 0,08 | 0,58 | 0,27 | -0,23 |
| <i>Radopholus similis</i> (indiv 100 g ⁻¹) | 0,01 | 0,53 | 0,28 | 0,12 |
| Estado nutricional de la planta | | | | |
| N % ebms | 0,37 | 0,13 | 0,43 | 0,20 |
| P % ebms | 0,19 | 0,50 | -0,16 | 0,24 |
| K % ebms | 0,24 | 0,22 | 0,17 | -0,39 |
| Ca % ebms | 0,16 | -0,48 | 0,16 | 0,02 |
| Mg % ebms | 0,26 | -0,23 | 0,19 | 0,53 |
| S % ebms | 0,45 | 0,03 | 0,28 | 0,12 |
| Fe mg kg ⁻¹ | 0,37 | -0,10 | -0,19 | -0,32 |
| Mn mg kg ⁻¹ | 0,36 | 0,16 | -0,19 | -0,01 |
| Zn mg kg ⁻¹ | 0,37 | -0,04 | -0,30 | -0,26 |
| Cu mg kg ⁻¹ | 0,26 | -0,36 | -0,43 | -0,04 |
| B mg kg ⁻¹ | 0,02 | 0,47 | -0,24 | 0,16 |

*Componentes principales que explicaron más del 80% de la variación observada y cuyos autovalores fueron >1 .

Cuadro 3.7. Indicadores de calidad de suelo utilizados para conformar los conjuntos reducidos MDS_{PCA} y MDS_{EO} . MDS_{PCA} : conjunto reducido por análisis de componentes principales, y MDS_{EO} : conjunto reducido por criterio de expertos y revisión de literatura. $InCS_{qfb}$: obtenido para los tres sitios con indicadores químicos, físicos y biológicos. $InCS_{qf}$: obtenido para los tres sitios con indicadores químicos y físicos. $InCS_c$: obtenido para los sitios cultivados con indicadores químicos, físicos, biológicos, biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta.

| | | MDS_{PCA} | MDS_{EO} |
|---------------------------|-------------|--|--|
| InCS_{qfb} | SMAF | COT, pH, K, P, Na, % arena, % arcilla, RSSP, AWCD, RM, CBM y AEBg. | CIC, Textura, COT, pH, AI, RSSP, AWCD y CBM. |
| | CND | COT, pH, K, P, % arena, % arcilla y RSSP. | CIC, Textura, COT, pH, AI y RSSP. |
| InCS_c | SMAF | COT, pH, K, P, Na, % arena, % arcilla, RSSP, AWCD, RM, CBM, AEBg, CPC, CPF, APF, HPC, MPR, RF y <i>R.similis</i> . | CIC, Textura, COT, pH, AI, RSSP, AWCD, CBM, RF, <i>R.similis</i> , CPF, APF y MPR. |
| | CND | COT, pH, K, P, % arena, % arcilla, RSSP, CPC, CPF, APF, HPC, MPR, RF y <i>R.similis</i> . | CIC, Textura, COT, pH, AI, RSSP, RF, <i>R.similis</i> , CPF, APF y MPR. |

AI: acidez intercambiable. AEBg: Actividad enzimática de β -glucosidasa. AWCD: Desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). APC: Altura de hijo en edad cosecha. APF: Altura de hijo en edad floración. COT: % carbono orgánico total. CBM: Carbono de la biomasa microbiana. CPC: Circunferencia de planta en edad cosecha. CPF: Circunferencia de planta en edad floración. HPC: Hojas por planta en edad cosecha. K: potasio. MPR: Manos por racimo. Na: sodio. P: fósforo. RSSP: Resistencia a la penetración subsuperficial. RM: Respiración microbiana. RF: raíz funcional. *R.similis*: *Radopholus similis*.

Después de la interpretación y asignación de puntajes, y una vez concluida la selección de los indicadores y la conformación de los conjuntos reducidos (Cuadro 3.7), los indicadores se integraron para producir un $InCS_{qfb}$ con la metodología SMAF, y un $InCS_{qf}$ con la metodología CND. Luego, con cada una de las metodologías, se obtuvo un $InCS_c$ únicamente para AP y BP. Los valores de estos índices de calidad de suelos, $InCS_{qfb}$ y $InCS_{qf}$, para el BM y las condiciones BP y AP se presentan en la figura 3.7 a y b, mientras que los índices $InCS_c$, generado con SMAF y CND se muestran en la figura 3.7 c y d.

La figura 3.7 a muestra que no hay diferencias entre el valor de los índices de calidad de suelo generados utilizando el total de indicadores (TDS). No obstante, al utilizar conjuntos de indicadores reducidos como el MDS_{PCA} o MDS_{EO} se observaron diferencias entre sitios, siendo $InCS_{qfb}$ mayor en BM y la condición de AP, en comparación con BP.

Con la metodología CND los resultados obtenidos fueron similares, al emplear TDS no se observaron diferencias entre sitios, mientras que los conjuntos de indicadores reducidos evidenciaron un menor InCS_{qf} en la condición de BP, con una diferencia considerable con BM y la condición de AP (Figura 3.7 b). En cuanto al InCS_{c} obtenido, tanto con SMAF como con CND, y utilizando el TDS no se observaron diferencias entre los sitios evaluados. Pero al emplear los conjuntos reducidos, MDS_{PCA} o MDS_{EO} , la condición de AP presentó mayores índices de calidad de suelo que la condición de BP (Figura 3.7 c y d).

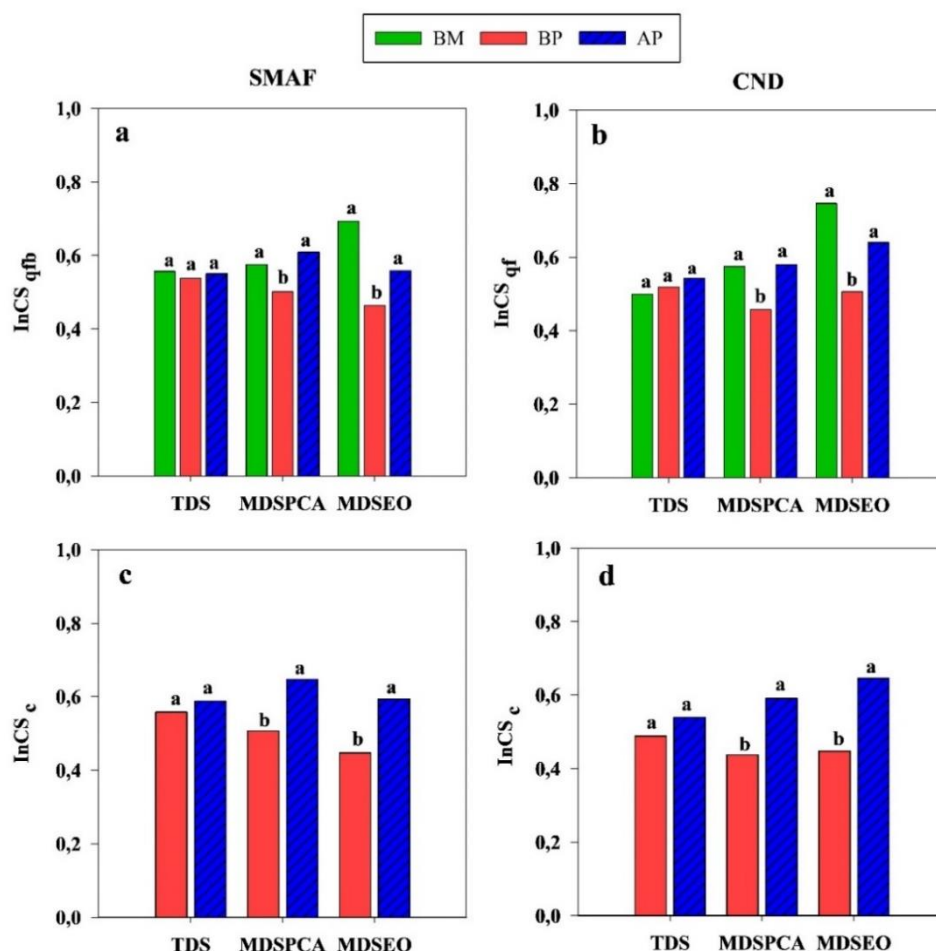


Figura 3.7. Índices de calidad de suelo en un bosque (BM) y en dos condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP). a. InCS_{qfb} : índice de calidad obtenido integrando indicadores químicos, físicos y biológicos, con metodología SMAF. b. InCS_{qf} : índice de calidad obtenido integrando indicadores químicos y físicos con la metodología CND. c y d. InCS_{c} : índice de calidad obtenido integrando indicadores químicos, físicos, biológicos, biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta con las metodologías SMAF y CND. Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas, según una prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). TDS: conjunto total de indicadores, MDS_{PCA} : conjunto reducido por análisis de componentes principales, y MDS_{EO} : conjunto reducido por criterio de expertos y revisión de literatura.

DISCUSIÓN

Análisis de los indicadores físicos, químicos y biológicos

Desde el punto de vista físico, la condición de AP y BM poseen una textura con un gran potencial para sostener rendimientos altos en el cultivo de banano, en contraste con la textura de la condición de BP, que posee un potencial medio a bajo (Jaramillo & Vázquez, 1980). El impacto de la textura en la fertilidad de las plantaciones de banano está bien documentado en la literatura (Arias et al., 2009c; Olivares et al., 2022). A diferencia de los otros suelos, el mayor porcentaje de arcilla y limo en la condición de BP proporcionó una mayor superficie específica, alta reactividad y CIC (Hepper et al., 2006; Yan et al., 2023), lo cual pudo influenciar las mayores concentraciones de nutrientes en este suelo. La estabilidad de agregados no ha sido ampliamente utilizada como indicador de la calidad de suelo en las plantaciones de banano. En el presente trabajo, mayor estabilidad de agregados en la condición de BP se atribuye a la influencia de las fracciones arcilla y limo (Chacón et al., 2015b; Schweizer et al., 2019), mientras que en BM se atribuye al contenido de COT (Dong et al., 2023). Por otro lado, la predominancia de arena en la condición de AP ha sido identificado como un factor que reduce la estabilidad de los agregados (Bruand et al., 2005). Resultados similares fueron reportados por Pattison et al. (2005), quienes registraron mayor estabilidad de agregados en suelos de bosque que en suelos bananeros.

Los resultados de este estudio indican que el suelo de BM tenía menor compactación que las condiciones BP y AP. Esto coincide con lo observado por Rasiah et al. (2009), quienes registraron mayor compactación en suelos de plantaciones de banano, en comparación con el suelo de un bosque. Por otro lado, la resistencia a la penetración fue más favorable para el cultivo de banano en la condición de AP (Vaquero, 2003), por el contrario, la compactación en la condición de BP, entre 0 y 100 cm de profundidad, es una condición crítica para el cultivo de banano, cuyo sistema radical se encuentra principalmente en los primeros centímetros del suelo (Stover & Simmonds, 1987). En cuanto a la humedad del suelo, el exceso o déficit puede generar estrés y afectar el rendimiento del cultivo de banano (Razi Ismai et al., 2004). En los tres suelos evaluados, el porcentaje de agua disponible se mantuvo alrededor del 20 % (humedad volumétrica), óptimo para el desarrollo del banano (van Wesemael et al., 2019). Este parámetro está influenciado por factores como las condiciones climáticas locales, el drenaje, la textura y la porosidad del

suelo (van Wesemael et al., 2019). En el caso de la condición de BP, la retención de humedad y disponibilidad de agua estuvo influenciada por la predominancia de microporos (Yan et al., 2023), mientras que, en la condición de AP y BM, la influencia se atribuye a la predominancia de macroporos (Bruand et al., 2005).

En contraste con BM, el análisis de la fertilidad en las condiciones de AP y BP mostró mayor disponibilidad de nutrientes y acidez. Un bosque es un sistema natural en el que el ciclaje de nutrientes tiende al equilibrio y es más circular (Strawn et al., 2019), en cambio, las plantaciones reciben un aporte de nutrientes a través de la fertilización para suplir la demanda nutricional de un cultivo intensivo (Pérez & Torres-Bazurto, 2020). Los niveles de acidez y pH registrados en el presente trabajo fueron adecuados para el cultivo de banano (López & Espinoza, 1995), no obstante, el uso de fuentes nitrogenadas amoniacales genera acidificación, lo que reduce la calidad del suelo (Fratoni et al., 2017). Al comparar el suelo de las condiciones de AP y BP, se observó mayor disponibilidad de nutrientes en BP, a pesar de su bajo historial productivo. Este resultado puede atribuirse, en primer lugar, a una CIC más alta (Hepper et al., 2006), pero también al bajo vigor y baja productividad, que suponen una menor extracción de nutrientes.

El aporte continuo de materia orgánica, proveniente de la vegetación, y la ausencia de intervención humana, pudieron haber influido en mayor COT en el suelo de BM (Dong et al., 2023). Este resultado concuerda con lo observado por Guimarães et al. (2014), quienes registraron mayor carbono orgánico en bosques que en sistemas agrícolas. Por otro lado, a medida que se desarrolla una plantación se registran pérdidas en el carbono orgánico del suelo (Ledo et al., 2020). Asimismo, el encalado y la aplicación de fertilizantes afectan la relación carbono nitrógeno (C/N), y la dinámica de mineralización de la materia orgánica (Guimarães et al., 2014). El COT en la condición de AP fue significativamente similar a la de BM, este resultado se atribuye a que el 66 % de la biomasa de una plantación de alto vigor regresa al suelo (Vargas & Flores, 1995).

Las concentraciones de Na en el suelo de BM fueron el doble de las de los sitios cultivados. A pesar de lo anterior, las concentraciones de Na registradas no representan una limitante para el cultivo (López & Espinoza, 1995) pero permiten inferir la sensibilidad de este parámetro al manejo. Altas concentraciones de Na en la zona, antes del establecimiento de sistemas de producción intensivos, puede deberse a la influencia del

material parental (Arias et al., 2009 a,b,c), intrusión salina (Arellano & Vargas, 2011) y transgresión Flandense (Bergoing, 2008). Por el contrario, en los sitios cultivados los bajos niveles de Na podrían estar asociados al uso de enmiendas a base de Ca y Mg, que compiten por sitios activos con este catión, y a las obras de drenaje, que favorecen las pérdidas por infiltración a estratos inferiores del suelo (Ahmad et al., 2013; Trejo-González et al., 2019).

La disponibilidad de Fe y Mn está influenciada por factores como pH, el material parental (Méndez & Bertsch, 2012), la textura, régimen de precipitación y drenaje (Naranjo-Morán et al., 2021). La textura de la condición de BP ha sido asociada a un mal drenaje y aumento de la disponibilidad de Fe y Mn (Fassbender & Bornemiza, 1987), por el contrario, en la condición de AP y BM se reduce la disponibilidad de estos metales (Lahav & Turner, 1992). La disponibilidad de Fe y Mn puede alcanzar concentraciones tóxicas para la raíz de la planta de banano (Soto, 2014). En el presente estudio, mayores concentraciones de Fe y Mn en el suelo, presencia de características redoximórficas y pérdida de raíces funcionales entre los 90 y 150 cm en la condición de BP, son evidencias de la influencia de las limitaciones de drenaje y limitaciones físicas como la resistencia del suelo a la penetración, además de la solubilidad de Fe y Mn (Li et al., 2019; Naranjo-Morán et al., 2021).

Seis indicadores biológicos proveyeron información sobre la actividad y diversidad biológica en el suelo, indicador de procesos como la descomposición de residuos orgánicos y ciclaje de nutrientes (Larkin, 2015). En el presente trabajo, el uso de Biolog®EcoPlate™, constituyó una herramienta práctica y sensible para determinar la huella metabólica de la microbiota del suelo en plantaciones de banano, lo que concuerda con los trabajos de otros autores como Chou et al. (2017), Fu et al. (2016) y Sánchez-Zúñiga et al. (2021). Por otra parte, los resultados obtenidos con el CBM concuerdan con otros reportes en los que la aplicación de agroquímicos y fertilizantes nitrogenados en plantaciones de banano reducen la actividad microbiana, determinada indirectamente con este parámetro (Cerdeña, 2008), en contraste, sistemas más equilibrados, en cuanto a cantidad y reciclaje de fuentes orgánicas (Durango et al., 2017). A pesar de que RM, ha sido muy utilizado en evaluaciones de calidad de suelo, en este trabajo este parámetro no mostró sensibilidad a las diferencias entre sitios, lo que concuerda con los resultados de Durango et al. (2015). Las enzimas deshidrogenasa y β -glucosidasa han sido reportadas como

indicadores de la calidad del suelo (Azañero, 2024). La deshidrogenasa está ligada exclusivamente a sistemas vivos y la β -glucosidasa, participa en el ciclo del carbono (Henríquez et al., 2014), por lo que la actividad de ambas enzimas indica mayor actividad biológica e influye en la dinámica del carbono orgánico en BM y la condición de AP. Por otro lado, en BP y AP el pH es más favorable para la actividad de ambas enzimas, que se incrementa en un rango de 5,5 a 7,5 (Wang & Kuzyakov, 2024). Este resultado resalta la importancia de incluir la actividad enzimática en estudios de calidad de suelo.

Análisis de los indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta

Estudios recientes han demostrado la relevancia de los indicadores biométricos en relación con la productividad y la calidad del suelo en el cultivo de banano (Olivares et al., 2022). Los resultados obtenidos en el presente trabajo concuerdan con los hallazgos de otras investigaciones en plantaciones de banano de alta productividad con mejores parámetros biométricos, mayor rendimiento y altos índices de calidad (González García et al., 2021; Villarreal-Núñez et al., 2013). Por la estrecha relación con la productividad, la evaluación de indicadores relacionados con el sistema radical del banano adquiere gran relevancia (Serrano, 2003; Pattison et al., 2005). A diferencia de otros trabajos, que han señalado la raíz funcional y las poblaciones de nematodos fitoparásitos como indicadores sensibles (Pattison et al., 2008; Yogaswara et al., 2021), el presente estudio no encontró diferencias en estos indicadores. Con respecto a los niveles nutricionales en el tejido foliar de la planta, ambas condiciones de producción de banano se encuentran en los rangos óptimos (López & Espinoza, 1995), no obstante, en BP las mayores concentraciones de Ca, Mg, Mn, Zn y Cu a nivel foliar pueden explicarse con la relación 1:1 que guardan con las concentraciones del suelo (Strawn et al., 2019).

Evaluación de la calidad del suelo

En general los índices de calidad obtenidos en AP y BM se encuentran en la categoría bueno y muy bueno, mientras que en BP los índices obtenidos se encuentran muy cerca de la categoría regular (Delgado, Rosales, et al., 2010). Entre las dos condiciones de producción de banano, la mayor calidad de suelo fue evidenciada en la condición de AP a través de mayores InCS, este resultado coincide con un registro de mayor calidad de suelo en plantaciones de banano de alta productividad, reportado por Delgado et al. (2010) y

Villarreal-Núñez et al. (2013). A pesar de lo anterior, BM presentó mayor InCS que las condiciones de AP y BP, resaltando el deterioro de la calidad física y biológica del suelo en sistemas agrícolas intensivos (Culma et al., 2017; Marion et al., 2022).

A pesar de que un amplio rango de indicadores ha sido utilizado para evaluar la calidad del suelo (Lima et al., 2013), los resultados de este trabajo mostraron que un conjunto integrado por la totalidad de los indicadores (TDS) no fue sensible a las diferencias en la calidad del suelo en los sitios evaluados. Lo anterior se debe a la redundancia entre indicadores o autocorrelación entre algunos (Cherubin et al., 2016), sin mencionar que esta estrategia requiere una alta inversión de recursos y tiempo, y demanda una interpretación más compleja (Marion et al., 2022). En contraste, el presente trabajo evidenció mayor sensibilidad por parte de los conjuntos reducidos. El MDS_{EO} , reducido al mínimo por una revisión de literatura y el criterio experto, aumentan la eficiencia los indicadores seleccionados, no obstante, esta estrategia ha sido caracterizada por la subjetividad para la selección de los indicadores. Por otro lado, el conjunto MDS_{PCA} , a través de un análisis multivariado elimina la subjetividad en la selección de indicadores y la redundancia entre ellos (Cherubin et al., 2016; Marion et al., 2022).

Otros trabajos han señalado una fuerte relación entre la calidad del suelo obtenida con conjuntos reducidos por análisis multivariados y el rendimiento de los cultivos (Mukherjee & Lal, 2014). Los indicadores que conformaron los conjuntos reducidos (MDS_{PCA} y MDS_{EO}) en el presente trabajo, coinciden con los indicadores recomendados en los manuales y guías más utilizados para la evaluación de la calidad del suelo (Moebius-Clune et al., 2016; USDA, 1999), así como en trabajos realizados en el cultivo de banano (Cornwell, 2014; Delgado et al., 2010; Pattison et al., 2008; Vallejo Quintero et al., 2020; Villarreal-Núñez et al., 2013; Olivares et al., 2022).

En cuanto a las metodologías utilizadas en este estudio, tanto SMAF como CND fueron consistentes para obtener InCS, tanto con los indicadores de suelo como con los del cultivo. SMAF es una herramienta ampliamente utilizada para la evaluación de la calidad del suelo (Andrews et al., 2004; Cherubin et al., 2016; Marion et al., 2022), no obstante, las condiciones específicas del estudio y el cultivo determinan los rangos altos y bajos para la interpretación de los indicadores, por lo que debe considerarse al extrapolar los resultados a otros sitios y condiciones (Bünemann et al., 2018). Por otro lado, por

medio de la metodología CND los parámetros de interpretación utilizados, desviación estándar y promedio, son obtenidos de bases de datos regionales o nacionales disponibles, que agrupan una gran cantidad de información (Moebius-Clune et al., 2016). Aun cuando en el presente estudio no se contó con indicadores biológicos para obtener índices con esta metodología, la disponibilidad de grandes bases de datos de parámetros físicos y químicos de los suelos de Costa Rica, permitió utilizarla por primera vez en el cultivo de banano. No obstante, en otras condiciones la ausencia de información o acceso se convertiría en una de las principales limitaciones para usar esta metodología.

CONCLUSIONES

Al comparar las condiciones de producción, los indicadores físicos, biológicos y biométricos fueron más apropiados en la condición de AP, lo que repercutió en un mayor índice de calidad en este suelo.

En contraste con BM, AP y BP presentaron mayor compactación, aumento en la fertilidad química y acidez, reducción del carbono orgánico total y la actividad biológica.

Las metodologías utilizadas en el presente estudio permitieron obtener índices de calidad de suelo, con los que se determinó que la calidad del suelo fue de la siguiente forma: $BM > AP > BP$.

En las condiciones de este estudio, las metodologías para interpretar los indicadores (SMAF o CND) fueron consistentes, por lo que podrían emplearse en futuras evaluaciones de la calidad de suelo en el cultivo de banano. No obstante, la metodología CND tiene como limitante la ausencia de información de indicadores biológicos.

Los conjuntos de indicadores reducidos (MDS_{PCA} o MDS_{EO}) fueron más sensibles que utilizar el total de indicadores (TDS) para detectar diferencias en la calidad del suelo en los sitios evaluados.

El conjunto MDS_{PCA} (carbono orgánico total, pH, K, P, Na, % arena, % arcilla, resistencia del suelo a la penetración subsuperficial, desarrollo de color promedio en cada pozo, respiración microbiana, carbono de la biomasa microbiana, actividad de la β -glucosidasa, circunferencia de planta en edad cosecha y en edad de floración, altura de hijo

en edad floración, hojas por planta en edad cosecha, manos por racimo, raíz funcional y poblaciones de *R.similis* en la raíz) reduce la subjetividad en la selección, así como la redundancia y correlación que ocurre al utilizar los otros conjuntos de indicadores. Por lo que se sugiere su uso para evaluar la calidad de suelo en condiciones similares a las de este estudio.

DISCUSIÓN GENERAL

Los resultados de este trabajo evidenciaron que la calidad del suelo es un factor crítico para la productividad agrícola (Larson & Pierce, 1991), especialmente en cultivos intensivos como el banano, debido a su capacidad de sostener el crecimiento de plantas (Karlen et al., 1997). Diversos estudios han demostrado que un manejo adecuado del suelo aumenta significativamente la sostenibilidad y los rendimientos agrícolas (Chaparro et al., 2012; Miner et al., 2020). Los estudios recientes realizados en Costa Rica revelan diferencias en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos bajo cultivo de banano, en comparación con suelos forestales o no intervenidos (Cerdeira et al., 2008; Cornwell 2014; Delgado et al., 2010; Londoño 2006; Peña & Acuña, 2008).

Los suelos de AP y BM mostraron mayores contenidos de carbono orgánico total (COT) y una menor densidad aparente, factores clave para la sostenibilidad del cultivo. En cambio, los suelos de BP presentaron mayor compactación y limitaciones de drenaje, factores que pueden afectar negativamente la productividad del banano (Vaquero, 2003; Stover & Simmonds, 1987). Las diferencias en la calidad del suelo también estuvieron influenciadas por la textura del suelo y su capacidad de retener agua. En los suelos de BP, la predominancia de microporos favoreció la retención de agua, mientras que en AP y BM predominaban los macroporos, lo que facilitó el drenaje y el movimiento del agua (Bruand et al., 2005; Yan et al., 2023). Estos resultados coinciden con estudios previos, como los de Rasiah et al. (2009) y López & Espinoza (1995), que sugieren que la compactación del suelo, especialmente en suelos profundos, puede limitar el desarrollo de las raíces y, en consecuencia, reducir el rendimiento del cultivo (Vaquero, 2003; Stover & Simmonds, 1987).

En cuanto a los indicadores químicos, la disponibilidad de nutrientes en los suelos cultivados fue mayor en comparación con el suelo de BM, lo que refleja la intervención humana a través de la fertilización (Pérez & Torres, 2021). Sin embargo, esta intervención también puede reducir la calidad del suelo a largo plazo, debido a fenómenos como la acidificación, inducida mayormente por el uso de fuentes nitrogenadas amoniacales (Frantoni et al., 2017).

Desde una perspectiva biológica, los indicadores de actividad microbiana, como el carbono de la biomasa microbiana (CBM) y la actividad enzimática de β -glucosidasa,

mostraron que los suelos bajo cultivo intensivo presentan una menor actividad biológica en comparación con suelos no intervenidos como el BM (Guimarães et al., 2014). Este hallazgo es consistente con la literatura que asocia sistemas agrícolas intensivos con menor biodiversidad y actividad de la microbiota del suelo, y una mayor dependencia de insumos externos para mantener la productividad (Durango et al., 2015).

Los resultados de este estudio revelaron que la calidad del suelo varía considerablemente entre plantaciones de banano y sistemas no intervenidos, y que el manejo adecuado del suelo es fundamental para la sostenibilidad del cultivo. Las metodologías empleadas para la evaluación de la calidad del suelo, como SMAF y CND, proporcionaron resultados consistentes, aunque en el caso de CND el acceso a datos específicos y regionales es crucial para su uso. Los conjuntos reducidos de indicadores resultaron ser más eficientes y precisos para detectar diferencias en la calidad del suelo, lo que sugiere su utilidad en futuras evaluaciones en condiciones similares. Por tanto, es esencial que los futuros estudios sobre la calidad del suelo en el cultivo de banano continúen con un enfoque integral que considere el uso de indicadores físicos, químicos y biológico del suelo, así como indicadores del cultivo, la participación de los factores formadores del suelo en el sitio y el manejo del cultivo.

CONCLUSIONES GENERALES

La evaluación de la calidad del suelo es una herramienta importante para trazar la línea de ruta para mantener la productividad agrícola y asegurar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

En las condiciones de este estudio, las metodologías para interpretar los indicadores (SMAF o CND) permitieron obtener índices de calidad de suelo consistentes, por lo que podrían emplearse en futuras evaluaciones de la calidad de suelo en el cultivo de banano. La ausencia de información de indicadores biológicos en la base de datos del mapa de suelos de Costa Rica constituye la principal limitante para el uso de la metodología CND.

La calidad del suelo fue de la siguiente forma: BM > AP > BP.

Las dos condiciones de cultivo evaluadas (AP y BP) presentaron mayor fertilidad química, acidez, compactación y menor actividad biológica que el BM.

Entre las dos condiciones de cultivo evaluadas, AP tuvo mejor calidad de suelo que BP, debido principalmente a mejores condiciones físicas, biológicas y al vigor de la plantación, evidenciada a través de los indicadores de cultivo utilizados en este trabajo.

Los conjuntos de indicadores reducidos (MDS_{PCA} o MDS_{EO}) fueron más sensibles que utilizar el total de indicadores (TDS) para detectar diferencias en la calidad del suelo en los sitios evaluados.

El conjunto MDS_{PCA} (Carbono orgánico total, pH, K, P, Na, % arena, % arcilla, resistencia del suelo a la penetración subsuperficial, desarrollo de color promedio en cada pozo, respiración microbiana, carbono de la biomasa microbiana, actividad de la β -glucosidasa, circunferencia de planta en edad cosecha y en edad de floración, altura de hijo en edad floración, hojas por planta en edad cosecha, manos por racimo, raíz funcional y poblaciones de *R.similis* en la raíz), reduce la subjetividad en la selección, así como la redundancia y correlación que ocurre al utilizar los otros conjuntos de indicadores por lo que se sugiere su uso para evaluar la calidad de suelo en condiciones similares a las de este estudio.

RECOMENDACIONES GENERALES

Realizar una evaluación de la calidad del suelo que considere la diversidad de suelos de las zonas de producción de banano en Costa Rica, utilizando el conjunto MDS_{PCA} generado en este estudio. Con esta evaluación se evidenciaría el estado de la calidad del suelo y se identificarían acciones y prácticas para mejorarla o mantenerla.

Trasladar la metodología utilizada en este trabajo a otras actividades agrícolas como la producción de hortalizas, piña, cultivos forestales, producción animal, etc., para generar nuevos índices de calidad de suelo.

Incorporar el uso de tecnologías como índices de vegetación, mapeo y modelado de la calidad del suelo, que constituya una herramienta lograr una gestión más eficiente del suelo a nivel regional y nacional.

LITERATURA CITADA

- Abiven, S., Menasseri, S., & Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>
- Afanador-Barajas, L. N., Coca Peña, D. A., Vargas Giraldo, A. F., Bautista Murcia, M. F., Mendoza Hernández, A., & Vallejo Quintero, V. E. (2020). Evaluación de la calidad de suelos en agroecosistemas de Colombia a través de la selección de un conjunto mínimo de datos. *Colombia Forestal*, 23(1), 1-12. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2020.1.a01>
- Ahmad, S., Ghafoor, A., Akhtar, M. E., & Khan, M. Z. (2013). Ionic displacement and reclamation of saline-sodic soils using chemical amendments and crop rotation. *Land Degradation and Development*, 24(2), 170-178. <https://doi.org/10.1002/ldr.1117>
- Alvarado, A. (2022). *Suelos de Centroamérica*. Editoriales Universitarias Públicas Costarricenses.
- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014a). Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: I. Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 31-43. <https://doi.org/10.15517/rac.v38i1.15160>
- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014b). Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: II. Mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxídico caoliníticas. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 45-58. <https://doi.org/10.15517/rac.v38i1.15161>
- Anderson, T. H. (1982). Measurement of CO₂ evolution rates. In: K. Alef & P. Nannipieri (Eds), *Methods in applied soil microbiology and biochemistry* (pp. 831-871). Academic Press.

- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The Soil Management Assessment Framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>
- Araya, M. (2002). Metodología utilizada en el laboratorio de Nematología de CORBANA SA para la extracción de nematodos de las raíces de banano (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*). *Corbana*, 28(55), 97-110.
- Arellano, F., & Vargas, A. (2011). Casos de contaminación por intrusión salina en acuíferos costeros de la Península de Nicoya (Costa Rica). *Revista Geológica de América Central*, 25, 109-126. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i25.8540>
- Arias Salguero, M., Vargas, A., & Guérin, R. (2003). Geofísica aplicada al problema de la intrusión salina en los acuíferos de Costa Rica. En *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos* (pp. 203-218). IGME.
- Arias, F., Mata, R., Alvarado, A., Serrano, E., & Laguna, J. (2009a). Caracterización química y clasificación taxonómica de algunos suelos cultivados con banano en las llanuras aluviales del Caribe de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 34(2), 73-86. <https://doi.org/10.15517/rac.v34i2.3631>
- Arias, F., Mata, R., Alvarado, A., Serrano, E., & Laguna, J. (2009b). Mineralogía de la fracción arcilla de algunos suelos cultivados con banano en las llanuras aluviales del Caribe de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 34(2), 87-98. <https://doi.org/10.15517/rac.v34i2.3632>
- Arias, F., Mata, R., Alvarado, A., Serrano, E., & Laguna, J. (2009c). Relación entre la mineralogía de la fracción arcilla y la fertilidad en algunos suelos cultivados con banano en las llanuras aluviales del Caribe de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 34(2), 99-111. <https://doi.org/10.15517/rac.v34i2.3633>
- Azañero, A. J. E. V., Riega, M. A. V., Chávez, S. V., Caja, D. K. M., & Gutierrez, F. D. C. (2024). Métodos para determinar la actividad enzimática en suelos contaminados. *South Sustainability*, 5(1), e092-e092.
- Bagnall, D. K., Morgan, C. L. S., Bean, G. M., Liptzin, D., Cappellazzi, S. B., Cope, M., Greub, K. L. H., Rieke, E. L., Norris, C. E., Tracy, P. W., Aberle, E., Ashworth, A., Tavarez, O. B., Bary, A. I., Baumhardt, R. L., Gracia, A. B., Brainard, D. C., Brennan, J. R., Reyes, D. B., Honeycutt, C. W. (2022). Selecting soil hydraulic properties as indicators of soil health: Measurement response to management and site characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, 86(1), 1-15. <https://doi.org/10.1002/saj2.20428>

- Bagnall, D. K., Morgan, C. L. S., Cope, M., Bean, G. M., Cappellazzi, S., Greub, K., Liptzin, D., Norris, C. L., Rieke, E., Tracy, P., Aberle, E., Ashworth, A., Bañuelos Tavarez, O., Bary, A., Baumhardt, R. L., Borbón Gracia, A., Brainard, D., Brennan, J., Briones Reyes, D., ... Honeycutt, C. W. (2022). Carbon-sensitive pedotransfer functions for plant available water. *Soil Science Society of America Journal*, 86(3), 1-14. <https://doi.org/10.1002/saj2.20395>
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*, 147(3-4), 159-171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>
- Battistini, R., & Bergoing, J. P. (1984). Geomorfología de la Costa Caribe de Costa Rica. *Revista Geográfica*, 99, 43-57.
- Bergoing, J. P. (2006). El cuaternario en Costa Rica: Proposición cronológica. *Revista Reflexiones*, 85(1-2), 97-114.
- Bergoing, J. P. (2008). La Transgresión Flandense. *Revista Geográfica*, 144, 229-239.
- Biswas, S., Singh, P., Rahaman, R., Patil, K. V., & De, N. (2023). Soil quality and crop productivity under 34 years old long-term rainfed rice-based cropping system in an Inceptisol of sub-tropical India. *Frontiers in Soil Science*, 3, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1155712>
- Blakemore, L. C., Searle, P. L., & Daly, B. K. (1987). *Method for chemical analysis of soils* (New Zealand Soil Bureau Scientific Report No. 80). New Zealand Soil Bureau.
- Blomme, G., Dita, M., Jacobsen, K. S., Vicente, L. P., Molina, A., Ocimati, W., Poussier, S., & Prior, P. (2017). Bacterial diseases of bananas and enset: Current state of knowledge and integrated approaches toward sustainable management. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1290. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01290>
- Bohn, H. L., Myer, R. A., & O'Connor, G. A. (2002). *Soil Chemistry* (2a ed.). John Wiley & Sons.
- Briceño, J., & Pacheco, R. (1984). *Métodos analíticos para el estudio de suelos y plantas*. Universidad de Costa Rica.
- Bruand, A., Hartmann, C., & Lesturgez, G. (2005, November 27 – December 2). Physical properties of tropical sandy soils: A large range of behaviours. In C. Hartmann (Ed.), *Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. A holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics*. [Proceedings of an international symposium]. L'Institut de Recherche pour le Développement, Khon Kaen, Thailand.

- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2011). *Soil Genesis and Classification* (6th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470960622>
- Burt, R. (2014). Soil survey field and laboratory methods manual. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, Kellog Soil Survey Laboratory.
- Buurman, P., Peterse, F., & Almendros Martin, G. (2007). Soil organic matter chemistry in allophanic soils: A pyrolysis-GC/MS study of a Costa Rican Andosol catena. *European Journal of Soil Science*, 58(6), 1330-1347. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00925.x>
- Camacho, M. E., Mata, R., & Forsythe, W. (2015). Labranza mecanizada de pasturas mediante tres implementos en un ultisol y sus implicaciones físicas e hidropedológicas. *Agronomía Costarricense*, 39(3), 47-59. <https://doi.org/10.15517/rac.v39i3.21812>
- Carvalho, M. L., de Moraes, M. T., Cerri, C. E. P., & Cherubin, M. R. (2020). Biochar amendment enhances water retention in a tropical sandy soil. *Agriculture*, 10(3), 62. <https://doi.org/10.3390/agriculture10030062>
- Castillo, R. (1993). *Geología de Costa Rica: Una sinopsis* (2nd ed.). Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Cerda, R. (2008). Calidad de suelos en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*), banano (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*) en el valle de Talamanca, Costa Rica. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Chacón, P., Lorenz, K., Lal, R., Calhoun, F. G., & Fausey, N. (2015a). Soil organic carbon in some land uses of Costa Rica. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil and Plant Science*, 65(4), 281-292. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1008563>
- Chacón, P., Lorenz, K., Lal, R., Calhoun, F. G., & Fausey, N. R. (2015b). Association of soil organic carbon with physically separated soil fractions in different land uses of Costa Rica. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil and Plant Science*, 65(5), 373-383. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1020859>

- Chaparro, J. M., Sheflin, A. M., Manter, D. K., & Vivanco, J. M. (2012). Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 48(5), 489-499. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0691-4>
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Cerri, C. E. P., Franco, A. L. C., Tormena, C. A., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS ONE*, 11(3), e0150860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>
- Chin-Pampillo, J. S., Carazo-Rojas, E., Pérez-Rojas, G., Castro-Gutiérrez, V., & Rodríguez-Rodríguez, C. E. (2015). Accelerated biodegradation of selected nematicides in tropical crop soils from Costa Rica. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(2), 971-980. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3414-6>
- Chou, Y. M., Shen, F. T., Chiang, S. C., & Chang, C. M. (2017). Functional diversity and dominant populations of bacteria in banana plantation soils as influenced by long-term organic and conventional farming. *Applied Soil Ecology*, 110, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.11.002>
- Cornwell, E. (2014). Effects of different agricultural systems on soil quality in Northern Limón Province, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 62(3), 1023-1035. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i3.14062>
- Corporación Bananera Nacional. (2024). *Estadísticas de exportación bananera 2023*. Mundo Creativo S.A.
- Cubero, D. (2015). Suelos de Costa Rica orden Inceptisol. En *INTA-Costa Rica*.
- Culma, R. A. H., Rodríguez, L. I. C., & Malaxechebarría, Á. M. G. (2017). Soil quality index in conventional and semi-ecological farms producing plantain (*Musa AAB Simmonds cv. Dominic Harton*) in Anolaima-Cundinamarca, Colombia. *Acta Agronómica*, 66(4), 515-522. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n4.61271>
- da Luz, F. B., da Silva, V. R., Kochem Mallmann, F. J., Bonini Pires, C. A., Debiasi, H., Franchini, J. C., & Cherubin, M. R. (2019). Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 281, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.006>
- Das, P., Savani, A. K., Sharma, R., Bhattacharyya, A., Malarvizhi, M., Ayesha, Ravishankar, K. V., & Sen, P. (2023). *Fusarium* wilt in banana: unraveling molecular aspects of host–

- pathogen interaction and resistance mechanism. *Vegetos*, 36, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s42535-023-00682-6>
- Day, P. R. (2015). Particle fractionation and particle-size analysis. En *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c43>
- Delgado, E., Rosales, F., Trejos, J., Villalobos, M., & Pocasangre, L. (2010). Índice de calidad y salud de suelos para plantaciones bananeras en cuatro países de América Latina y el Caribe. *Bioagro*, 22(1), 53–60.
- Delgado-Baquerizo, M., Powell, J. R., Hamonts, K., Reith, F., Mele, P., Brown, M. V., Dennis, P. G., Ferrari, B. C., Fitzgerald, A., Young, A., Singh, B. K., & Bissett, A. (2017). Circular linkages between soil biodiversity, fertility, and plant productivity are limited to topsoil at the continental scale. *New Phytologist*, 215(3), 1185-1196. <https://doi.org/10.1111/nph.14634>
- Díaz Romeu, R., & Hunter, A. (1982). *Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero*. CATIE.
- Dóndoli, C., Dengo, G., & Malavassi, E. (1968). *Mapa Geológico de Costa Rica*. Ministerio de Industria y Comercio, Dirección de Geología, Minas y Petróleo.
- Dong, X., Zhao, K., Wang, J., Gui, H., Xiao, Y., Chen, Z., Miao, Y., & Han, S. (2023). Effects of forest types on soil carbon content in aggregate fractions under climate transition zone. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1052175. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1052175>
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. En *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment: Proceedings of a Symposium, Minneapolis, MN, 1992* (pp. 3-21). Soil Science Society of America.
- Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek, D. F., & Stewart, B. A. (2015). Defining soil quality for a sustainable environment. En *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 1-17). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35>
- Durango Cabanilla, W. D. (2017). Evaluación de enmiendas orgánicas sobre la respiración microbiana del suelo y variables agronómicas en banano. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 2(8), 28-32. <https://doi.org/10.26910/issn.2528-8083vol2iss8.2017pp28-32>

- 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. <https://doi.org/10.15517/rac.v39i1.19543>
- Elementar Analysensysteme GmbH. (2011). *Vario Macro Cube Elemental Analyzer Condensed Manual*. Elementar Analysensysteme GmbH.
- Emerson, W. W., & McGarry, D. (2003). Organic carbon and soil porosity. *Australian Journal of Soil Research*, 41(1), 57-73. <https://doi.org/10.1071/SR01064>
- Fassbender, H., & Bornemiza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. IICA.
- Food and Agriculture Organization. (2020). *Análisis del mercado del banano*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization. (2021). *Standard operating procedure for soil pH determination*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Forsythe, W. (1980). *Física de suelos: Manual de laboratorio*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.
- Fratoni, M. M. J., Moreira, A., Moraes, L. A. C., Almeida, L. H. C., & Pereira, J. C. R. (2017). Effect of nitrogen and potassium fertilization on banana plants cultivated in the humid tropical Amazon. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(13), 1477-1488. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1373791>
- Fu, L., Ruan, Y., Tao, C., Li, R., & Shen, Q. (2016). Continuous application of bioorganic fertilizer induced resilient culturable bacteria community associated with banana *Fusarium* wilt suppression. *Scientific Reports*, 6, 27731. <https://doi.org/10.1038/srep27731>
- Gauggel, C., Sierra, F., & Arévalo, G. (2005). The problem of banana root deterioration and its impact on production: Latin America's experience. En *Banana Root System: Towards a Better Understanding for its Productive Management: Proceedings of an International Symposium* (pp. 251-260). International Network for the Improvement of Banana and Plantain.
- Geissen, V., Ramos, F. Q., Bastidas-Bastidas, P. D. J., Díaz-González, G., Bello-Mendoza, R., Huerta-Lwanga, E., & Ruiz-Suárez, L. E. (2010). Soil and water pollution in a banana production region in tropical Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 85(4), 407-413. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0077-y>

- Gibbs, H. K., Ruesch, A. S., Achard, F., Clayton, M. K., Holmgren, P., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2010). Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(38), 16732-16737. <https://doi.org/10.1073/pnas.0910275107>
- Golubouay, J., & Vega, H. (1988). *Cambio y continuidad en la economía bananera: La actividad bananera en Costa Rica*. FLACSO.
- González García, H., González Pedraza, A. F., Rodríguez Yzquierdo, G., León Pacheco, R., & Betancourt Vásquez, M. (2021). Vigor en plantas de plátano (*Musa AAB* cv. Hartón) y su relación con características físicas, químicas y biológicas del suelo. *Agronomía Costarricense*. <https://doi.org/10.15517/rac.v45i2.47772>
- Grant, W. (1982). *Methods of soil analysis* (2nd ed., pp. 161-164). Madison, USA.
- Guimarães, D. V., Gonzaga, M. I. S., & Melo Neto, J. de O. (2014). Management of soil organic matter and carbon storage in tropical fruit crops. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(3), 241-248. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000300009>
- Henríquez, C., & Cabalceta, G. (2012). *Guía Práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola* (2nd ed.). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Henríquez, C., Uribe, L., Valenciano, A., & Nogales, R. (2014). Actividad enzimática del suelo -Deshidrogenasa, β -Glucosidasa, Fosfatasa y Ureasa- bajo diferentes cultivos. *Agronomía Costarricense*. <https://doi.org/10.15517/rac.v38i1.15118>
- Hepper, E. N., Buschiazzo, D. E., Hevia, G. G., Urioste, A., & Antón, L. (2006). Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents. *Geoderma*, 135(1-2), 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.12.005>
- Holdridge, L. (1987). *Ecología basada en zonas de vida (Ecology based on life zones)* (en línea). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DO2003100523>
- Horneck, D., & Miller, R. (1998). Determination of total nitrogen in plant tissue. En Kalra, Y. P. (Ed.), *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis* (pp. 75-83). CRC Press.
- Jadín, I., Meyfroidt, P., & Lambin, E. F. (2016). International trade, and land use intensification and spatial reorganization explain Costa Rica's Forest transition. *Environmental Research Letters*, 11(3), 035005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035005>

- Janzen, H. H., Janzen, D. W., & Gregorich, E. G. (2021). The 'soil health' metaphor: ¿Illuminating or illusory? *Soil Biology and Biochemistry*, *159*, 108167. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108167>
- 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*. Asociación Bananera Nacional.
- Jat, M. L., Gathala, M. K., Choudhary, M., Sharma, S., Jat, H. S., Gupta, N., & Yadvinder-Singh. (2023). Conservation agriculture for regenerating soil health and climate change mitigation in smallholder systems of South Asia. En *Advances in Agronomy* (Vol. 181, pp. 1-39). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.05.003>
- Jiménez, T. (1972). *Génesis, Clasificación y capacidad de uso de algunos suelos de la región Atlántica de Costa Rica* (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica.
- Juhos, K., Szabó, S., & Ladányi, M. (2016). Explore the influence of soil quality on crop yield using statistically-derived pedological indicators. *Ecological Indicators*, *63*, 366-373. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.029>
- Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2020). Conservation strategies for improving soil quality and organic matter storage. En *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils* (pp. 295-310). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003075561-15>
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., Schuman, G. E., & Soil Science Society of America. (1997). Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, *61*(1), 4-10. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Karlen, D. L., Veum, K. S., Sudduth, K. A., Obrycki, J. F., & Nunes, M. R. (2019). Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. *Soil and Tillage Research*, *195*, 104365. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>
- Kemper, W., & Rosenau, R. (1986). Aggregate stability of soils from the western portions of the United States and Canada. *USDA Tech. Bull. 1355*. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *363*(1492), 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Lahav, E., & Turner, D. (1992). Fertilización del banano para rendimientos altos. Segunda edición. Boletín No 7. International Potash Institute. Quito, Ecuador. 71 p.

- Lal, R. (1998). *Soil quality and agricultural sustainability*. CRC Press.
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3199-3221. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
- Larkin, R. P. (2015). Soil health paradigms and implications for disease management. *Annual Review of Phytopathology*, 53, 199-221. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120357>
- Larson, W., & Pierce, F. (1991). Conservation and enhancement of soil quality. *International Board Soil Research Management*.
- Ledo, A., Smith, P., Zerihun, A., Whitaker, J., Vicente-Vicente, J. L., Qin, Z., McNamara, N. P., Zinn, Y. L., Llorente, M., Liebig, M., Kuhnert, M., Dondini, M., Don, A., Diaz-Pines, E., Datta, A., Bakka, H., Aguilera, E., & Hillier, J. (2020). Changes in soil organic carbon under perennial crops. *Global Change Biology*, 26(7), 4158-4168. <https://doi.org/10.1111/gcb.15120>
- Li, J., Jia, Y., Dong, R., Huang, R., Liu, P., Li, X., Wang, Z., Liu, G., & Chen, Z. (2019). Advances in the mechanisms of plant tolerance to manganese toxicity. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(20), 5096. <https://doi.org/10.3390/ijms20205096>
- Li, Y., Xu, M., Zou, X., Shi, P., & Zhang, Y. (2005). Comparing soil organic carbon dynamics in plantation and secondary forest in wet tropics in Puerto Rico. *Global Change Biology*, 11(2), 239-248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00896.x>
- Li, Z., Jiao, Y., Yin, J., Li, D., Wang, B., Zhang, K., Zheng, X., Hong, Y., Zhang, H., Xie, C., Li, Y., Duan, Y., Hu, Y., Zhu, Z., & Liu, Y. (2021). Productivity and quality of banana in response to chemical fertilizer reduction with bio-organic fertilizer: Insight into soil properties and microbial ecology. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 322, 107659. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107659>
- Lima, A. C. R., Brussaard, L., Totola, M. R., Hoogmoed, W. B., & de Goede, R. G. M. (2013). A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. *Applied Soil Ecology*, 64, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.12.009>
- Londoño, S. (2006). *Caracterización de nemátodos de vida libre como bioindicadores de calidad y salud de suelos bananeros en Costa Rica* (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- López, A., & Espinoza, J. (1995). Manual de nutrición y fertilización del banano. INPOFOS. Quito, Ecuador.

- López, A., & Espinoza, J. (2008). Manual de nutrición y fertilización del banano. *International Plant Nutrition Institute, 1*.
- Luan, L., Liang, C., Chen, L., Wang, H., Xu, Q., Jiang, Y., & Sun, B. (2020). Coupling bacterial community assembly to microbial metabolism across soil profiles. *MSystems*, 5(3), e00298-20. <https://doi.org/10.1128/msystems.00298-20>
- Marion, L. F., Schneider, R., Cherubin, M. R., Colares, G. S., Wiesel, P. G., da Costa, A. B., & Lobo, E. A. (2022). Development of a soil quality index to evaluate agricultural cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 218, 105293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105293>
- Martínez-Solórzano, G. E., & Rey-Brina, J. C. (2021). Bananos (*Musa* AAA): Importancia, producción y comercio en tiempos de Covid-19. *Agronomía Mesoamericana*. <https://doi.org/10.15517/am.v32i3.43610>
- Martínez-Solórzano, G. E., Rey-Brina, J. C., Pargas-Pichardo, R. E., & Enrique-Manzanilla, E. (2020). *Fusarium* wilt by tropical race 4: Current status and presence in the American continent. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 77-87. <https://doi.org/10.15517/am.v31i1.37925>
- Martin-Prével, P. (1974). Les méthodes d'échantillonnage pour l'analyse foliaire du bananier. *Fruits*, 29(9), 583-588.
- Martin-Prével, P., Gardner, F. P., & Gautier, P. (1988). Plant analysis as a guide to the nutrient requirement of temperate and tropical crops. *Field Crops Research*, 19(1), 1-17. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(88\)90036-6](https://doi.org/10.1016/0378-4290(88)90036-6)
- McClearn, D., Arroyo-Mora, J. P., Castro, E., Coleman, R. C., Espeleta, J. F., García-Robledo, C., ... & Timm, R. M. (2016). The Caribbean lowland evergreen moist and wet forests. En M. Kappelle (Ed.), *Costa Rica ecosystems* (pp. 1-744). University of Chicago Press.
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15(12), 1409-1416.
- Méndez, J. C., & Bertsch, F. (2012). *Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica*. ACCS.
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2003). *Decreto Ejecutivo N° 31597-MINAE. Regulación del cambio de uso de suelo en áreas boscosas*. Publicado en La Gaceta, Diario Oficial, N° 169.

- Miner, G. L., Delgado, J. A., Ippolito, J. A., & Stewart, C. E. (2020). Soil health management practices and crop productivity. *Agricultural and Environmental Letters*, 5(1), 1-5. <https://doi.org/10.1002/ael2.20023>
- Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., van Es, H. M., Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Wolfe, D. W., & Abawi, G. S. (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework Manual* (3.1 ed.). Cornell University.
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2014). Comparison of soil quality index using three methods. *PLoS ONE*, 9(8), e105981. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981>
- Mulat, Y., Kibret, K., Bedadi, B., & Mohammed, M. (2021). Soil quality evaluation under different land use types in Kersa sub-watershed, eastern Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 10(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s40068-021-00224-6>
- Naranjo-Morán, J., Vera-Morales, M., & Mora-González, A. (2021). Acumulaciones de hierro en agroecosistemas bananeros (Milagro, Ecuador): Una revisión bibliográfica de algunos factores que intervienen en la salud y nutrición del cultivo. *Siembra*, 8(2), 104-119. <https://doi.org/10.29166/siembra.v8i2.2680>
- Nieuwenhuys, A., Verburg, P. S. J., & Jongmans, A. G. (2000). Mineralogy of a soil chronosequence on andesitic lava in humid tropical Costa Rica. *Geoderma*, 98(1-2), 61-82. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00052-5)
- Noar, R. D., Thomas, E., & Daub, M. E. (2022). Genetic Characteristics and Metabolic Interactions between *Pseudocercospora fijiensis* and Banana: Progress toward Controlling Black Sigatoka. *Plants*, 11(7), 918. <https://doi.org/10.3390/plants11070948>
- 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, 105718. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105718>
- Ortega, R., Zuñiga, J., Segura, R., Torres, P., Blanco, F., & Sandoval, J. (2019). Biofertilización como suplemento en la nutrición del cultivo de banano (*Musa AAA*). *Corbana*. 45 (65): 51-66.
- Otvos, E. G. (2011). Hurricane signatures and landforms-toward improved interpretations and global storm climate chronology. *Sedimentary Geology*, 239(1-2), 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.04.014>

- Pattison, A. B., Moody, P. W., Badcock, K. A., Smith, L. J., Armour, J. A., Rasiah, V., Cobon, J. A., Gulino, L. M., & Mayer, R. (2008). Development of key soil health indicators for the Australian banana industry. *Applied Soil Ecology*, *40*(1), 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.04.002>
- Pattison, A. B., Moody, P. W., Badcock, K., & Smith, L. S. (2005). Banana root and soil health project-Australia. In D. W. Turner & F. Rosales (Eds.), *Banana root system: Towards a better understanding for its productive management* [Proceedings of an international symposium]. International Network for the Improvement of Banana and Plantain, Montpellier, France.
- Peña, W., & Acuña, O. (2008). Indicadores biológicos en la calidad y salud de suelos bananeros. *Calidad y Salud de Suelos Bananeros*.
- Pérez, W. A., & 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), 253-260.
- Posit Team. (2023). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Posit Software, PBC. <http://www.posit.co/>
- Prigigallo, M. I., Gómez-Lama Cabanás, C., Mercado-Blanco, J., & Bubici, G. (2022). Designing a synthetic microbial community devoted to biological control: The case study of *Fusarium* wilt of banana. *Frontiers in Microbiology*, *13*, 967885. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.967885>
- Rajput, A., Memon, M., Memon, K. S., Sial, T. A., & Laghari, H. B. (2022). Integrated nutrient management in banana: Comparative role of FYM and composted pressmud for the improvement of soil properties. *Pakistan Journal of Botany*, *54*(1), 367-374. [https://doi.org/10.30848/pjb2022-1\(34\)](https://doi.org/10.30848/pjb2022-1(34))
- Rasiah, V., Armour, J. D., Moody, P. W., Pattison, A. B., Lindsay, S., & Florentine, S. (2009). Characterising and improving the deteriorating trends in soil physical quality under banana. *Australian Journal of Soil Research*, *47*(6), 654-663. <https://doi.org/10.1071/SR08256>
- Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, *116*(1-2), 61-76. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)

- Razi Ismai, M., Yahya, M. K., & Majid, M. M. (2004). Growth, water relations, stomatal conductance and proline concentration in water stressed banana (*Musa spp.*) plants. *Asian Journal of Plant Sciences*, 3(6), 709-713. <https://doi.org/10.3923/ajps.2004.709.713>
- Recha, J. W., Olale, K. O., Sila, A. M., Ambaw, G., Radeny, M., & Solomon, D. (2022). Measuring soil quality indicators under different climate-smart land uses across East African Climate-Smart Villages. *Agronomy*, 12(2), 530. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020530>
- Rey, J., Martínez, G., Rodríguez, G., Lobo, D., Delgado, E., Trejos, J., Pocasangre, L., & Rosales, F. (2009). Aspectos sobre calidad y salud de suelos bananeros en Venezuela. *Producción Agropecuaria*, 2, 14-22.
- Rieke, E. L., Bagnall, D. K., Morgan, C. L. S., Flynn, K. D., Howe, J. A., Greub, K. L. H., Mac Bean, G., Cappellazzi, S. B., Cope, M., Liptzin, D., Norris, C. E., Tracy, P. W., Aberle, E., Ashworth, A., Bañuelos Tavarez, O., Bary, A. I., Baumhardt, R. L., Borbón Gracia, A., Brainard, D. C., ... Honeycutt, C. W. (2022). Evaluation of aggregate stability methods for soil health. *Geoderma*, 428, 116156. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116156>
- Rinot, O., Levy, G. J., Steinberger, Y., Svoray, T., & Eshel, G. (2019). Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Science of the Total Environment*, 648, 1484-1491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259>
- Rojas, N. (2011). *Estudio de las Cuencas hidrográficas de Costa Rica: Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico 2011*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones e Instituto Meteorológico Nacional.
- Rosales, F. E., Pocasangre, L. E., Trejos, J., Serrano, E., & Peña, W. (2008). Guía de Diagnóstico de la Calidad y Salud de Suelos. Bioersity International. Montpellier. Francia.
- Royal Eijkkelkamp. (2024). *Wet sieving apparatus. 08.13* (en línea, manual). Países Bajos. Consultado 10 febrero, 2024. Disponible en <https://www.royaleijkkelkamp.com/products/lab-testing-equipment/soil-physical-research/aggregate-stability/wet-sieving-apparatus/>
- Salguero, S. (2006). *Caracterización de nematodos de vida libre como bioindicadores de calidad y salud de suelos bananeros en Costa Rica* (Tesis de maestría, Agricultura Ecológica).

- Samaei, F., Emami, H., & Lakzian, A. (2022). Assessing soil quality of pasture and agriculture land uses in Shandiz county, northwestern Iran. *Ecological Indicators*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108974>
- Sánchez-Zúñiga, K., Tapia-Fernández, A., & Rivera-Méndez, W. E. (2021). Effect of three different agronomic conditions on biochemical profile and diversity in the rhizosphere of banana plantations infected with *Fusarium oxysporum* Race 1. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(2). <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.018>
- Sandoval, J. (2023). *Cosmovisión Cabécar del banano*. Litografía e Imprenta Segura Hermanos.
- Sarmiento Reyes, E. B., Fandiño Zabala, S. A., & Gómez Echeverri, L. F. (2018). Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática. *Ecosistemas*, 27(3).
- Schoeneberger, P., Wysocki, D., & Benham, E. (2012). *Field book for describing and sampling soils* (Versión 3.0). Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Schweizer, S. A., Bucka, F. B., Graf-Rosenfellner, M., & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil microaggregate size composition and organic matter distribution as affected by clay content. *Geoderma*, 355. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113901>
- Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. (2022). *Boletín Estadístico Agropecuario*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Consultado en www.sepsa.go.cr.
- Segura M, R. A., Stoorvogel, J. J., Blanco R, F. A., & Sandoval F., J. A. (2021). A medium-term field experiment to study the effect of managing soil chemical properties on *Fusarium* wilt in banana (*Musa* AAA). *Journal of Fungi*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/jof7040261>
- Segura, R. A., Stoorvogel, J. J., Samuels, J. Z., & Sandoval, J. A. (2018). Managing the interactions between soil abiotic factors to alleviate the effect of *Fusarium* wilt in bananas. *Acta Horticulturae*, 1196. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1196.19>
- Serrano, E. (2003). Relationship between functional root content and banana yield in Costa Rica. *Banana Root System: Towards a Better Understanding for Its Productive Management. Proceedings of an International Symposium Held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003*.
- Serrano, E. (2005). Relationship between functional root content and banana yield in Costa Rica. In D. W. Turner & F. Rosales (Eds.), *Banana root system: towards a better*

understanding for its productive management. Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica (pp. 25-34).

- Serrano, E., Sandoval, J., Pocasangre, L., Rosales, F., & Delgado, E. (2006). Importancia de los indicadores físico-químicos en la calidad del suelo para la producción sustentable del banano en Costa Rica. *Proceedings XVII Reunião Internacional da Associação para a Cooperação nas Pesquisas sobre Banana no Caribe e na América Tropical (ACORBAT)*, 207-221.
- Seybold, C. A., Mausbach, M. J., Karlen, D. L., & Rogers, H. H. (2018). Quantification of soil quality. In R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follett, & B. A. Stewart (Eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle* (pp. 387-404). <https://doi.org/10.1201/9780203739273>
- Shah, S., & Sharma, A. (2023). Impacts of tropical rainforest conversion on soil nutrient pools in Viti Levu, Fiji. *Pacific Science*, 77(1). <https://doi.org/10.2984/77.1.2>
- Shook, J., Gangopadhyay, T., Wu, L., Ganapathysubramanian, B., Sarkar, S., & Singh, A. K. (2021). Crop yield prediction integrating genotype and weather variables using deep learning. *PLoS ONE*, 16(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252402>
- Silva, A. C. B. da, Oliveira, F. G., & Braga, R. N. da F. G. P. (2023). Yield prediction in banana (*Musa* sp.) using STELLA model. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 45. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.58947>
- Silva, I. M. da, Rodrigues, S., Lima, H., Queiroz, H. M., Pereira Valani, G., & da Silva, A. P. (2022). Visual evaluation of soil structure in organic smallholder farms in the eastern Amazon: a useful tool to assess soil quality. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(9). <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1884225>
- Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico. (2023). *Mapa de Planificación Territorial SINAC – Bosque maduro* (en línea, sitio web). Consultado 30 julio, 2024. Disponible en <https://mapas.da.go.cr/>
- Sofo, A., & Ricciuti, P. (2019). A standardized method for estimating the functional diversity of soil bacterial community by Biolog® EcoPlates™ assay-The case study of a sustainable olive orchard. *Applied Sciences*, 9(19). <https://doi.org/10.3390/app9194035>
- Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos* (2ª ed.). Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture.
- Soto, M. (1992). *Banano cultivo y comercialización* (2ª ed.). Litografía e Imprenta LIL, S.A.
- Soto, M. (2014). *Bananos, conceptos básicos*. Tecnológico de Costa Rica.

- Sparks, D.L. (1996). *Methods of soil analysis part 3 chemical methods*. Soil Science Society of America, Wisconsin, USA.
- Staver, C. (2018). Good agricultural practices: ¿an end point or a starting point for more sustainable banana production? <https://doi.org/10.19103/as.2017.0020.14>
- Stoorvogel, J. J., & Segura, R. A. (2018). Nutrition and soil management in banana cultivation. <https://doi.org/10.19103/as.2017.0020.16>
- Stover, R. H., & Simmonds, N. W. (1987). *Bananas* (No. Ed. 3).
- Strawn, D. G., Bohn, H. L., & O'Connor, G. A. (2019). *Soil chemistry*. John Wiley & Sons.
- Sun, J., Li, W., Li, C., Chang, W., Zhang, S., Zeng, Y., Zeng, C., & Peng, M. (2020). Effect of different rates of nitrogen fertilization on crop yield, soil properties and leaf physiological attributes in banana under subtropical regions of China. *Frontiers in Plant Science, 11*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.613760>
- Thoumazeau, A., Bessou, C., Renevier, M. S., Trap, J., Marichal, R., Mareschal, L., Decaëns, T., Bottinelli, N., Jaillard, B., Chevallier, T., Suvannang, N., Sajjaphan, K., Thaler, P., Gay, F., & Brauman, A. (2019). Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators, 97*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.023>
- Torres-Asuaje, P. E., Cotes-Prado, A. M., Echeverría-Beirute, F., Blanco-Rojas, F. A., Sandoval-Fernández, J. A., Segura-Mena, R. A., & Palomares-Rius, J. E. (2023). Ensilaged biostimulants promoting root health and control of *Radopholus similis* in banana (*Musa AAA*) cv. Grande Naine. *European Journal of Plant Pathology, 165*(3), 465-474.
- Trejo-González, N., Prieto-Méndez, J., Marmolejo-Santillán, Y., Acevedo-Sandoval, O. A., Madariaga-Navarrete, A., Aquino-Torres, E., Canales-Flores, R. A., & Prieto-García, F. (2019). Displacement of sodium, potassium, calcium, magnesium and improvements in a saline soil treated with organic and chemical amendments. *Asian Journal of Chemistry, 31*(12). <https://doi.org/10.14233/ajchem.2019.22228>
- Trejo-González, N., Prieto-Méndez, J., Marmolejo-Santillán, Y., Acevedo-Sandoval, O. A., Madariaga-Navarrete, A., Aquino-Torres, E., García-Bárcena, T. S., Ponce-Saavedra, J., & Bustos-Díaz, E. P. (2022). Use of earthworms as bioindicators of environmental sustainability in a coffee plantation. *Environmental Monitoring and Assessment, 194*(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10608-2>

- Turner, D. W., Fortescue, J. A., & Thomas, D. S. (2007). Environmental physiology of the bananas (*Musa* spp.). *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4). <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400013>
- United States Department of Agriculture. (1999). *Soil Quality Test Kit Guide. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. Departamento de Agricultura USDA.
- Vallejo Quintero, V. E., Afanador-Barajas, L. N., Coca Peña, D. A., Vargas Giraldo, A. F., Bautista Murcia, M. F., & Mendoza Hernández, A. (2020). Evaluación de la calidad de suelos en agroecosistemas de Colombia a través de la selección de un conjunto mínimo de datos. *Colombia Forestal*, 23(1). <https://doi.org/10.14483/2256201x.14856>
- van Es, H. M., & Karlen, D. L. (2019). Reanalysis validates soil health indicator sensitivity and correlation with long-term crop yields. *Soil Science Society of America Journal*, 83(3). <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.09.0338>
- van Wesemael, J., Kissel, E., Eyland, D., Lawson, T., Swennen, R., & Carpentier, S. (2019). Using growth and transpiration phenotyping under controlled conditions to select water efficient banana genotypes. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00352>
- Vance, E., Brookes, P., & Jenkinson, D. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19, 703-707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
- Vaquero, R. (2003). Soil physical properties and banana root growth. In D. Turner & F. Rosales (Eds.), *Banana Root System: towards a better understanding for its productive management* (pp. 125-131). Inibap.
- Vargas, A., Madrigal, M., Calvo, P., & Sáenz, M. V (2010). Efecto de la desflora y del desmane en la producción de banano (*Musa* AAA). *Corbana*, 45 (65), 93-106.
- Vargas, M. A., Elizondo, E. S., & Calvo, A. V. (2011). Relación entre el contenido de nutrientes en suelo y raíces de banano (*Musa* AAA) con el peso de raíz y número de nematodos. *Fitosanidad*, 15(3).
- Vargas, R., & Araya, M. (2018). Contenido de raíces en plantaciones comerciales de banano muestreadas en el intermedio madre hijo y frente del hijo de sucesión. *Corbana*, 44, 97-124.
- Vargas, R., & Flores, C. (1995). Retribución nutricional de los residuos de hojas, venas de hojas, pseudotallo y pinzote de Banano (*Musa* AAA) en fincas de diferentes edades de cultivo. *Corbana*, 20 (44), 33-47.

- Varma, V., & Bebbler, D. P. (2019). Climate change impacts on banana yields around the world. *Nature Climate Change*, 9(10). <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0559-9>
- Vellema, S., & Jansen, K. (2018). Sustainable banana cultivation: from standards to multiple solutions. <https://doi.org/10.19103/as.2017.0020.24>
- Villarreal-Núñez, J., Pla-Sentis, I., Agudo-Martínez, L., Villaláz-Pérez, J., Rosales, F., & Pocasangre, L. (2013). Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2). <https://doi.org/10.15517/am.v24i2.12530>
- Wang, C., & Kuzyakov, Y. (2024). Soil organic matter priming: The pH effects. *Global Change Biology*, 30(6), e17349.
- WingChing, J. R., & Uribe, L. L. (2016). Biomasa y actividad microbiana en suelos de uso ganadero y en regeneración de bosque. *Cuadernos de Investigación*, 8(1).
- Wu, J. S., Jiang, P. K., Chang, S. X., Xu, Q. F., & Lin, Y. (2010). Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China. *Canadian Journal of Soil Science*, 90(1). <https://doi.org/10.4141/CJSS09030>
- Wu, K., Yang, Q., & Zhao, R. (2021). A discussion on soil health assessment of arable land in China. *Acta Pedologica Sinica*, 58(3). <https://doi.org/10.11766/trxb202009280546>
- Xiong, X., Zhou, G., & Zhang, D. (2020). Soil organic carbon accumulation modes between pioneer and old-growth forest ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 57(12). <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13747>
- Yan, F., Tuller, M., de Jonge, L. W., Moldrup, P., & Arthur, E. (2023). Specific surface area of soils with different clay mineralogy can be estimated from a single hygroscopic water content. *Geoderma*, 438. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116614>
- Yogaswara, D. A., Kasmara, H., & Hermawan, W. (2021). Using nematode community to evaluate banana soil food web in Mekargalih, Cianjur, West Java. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 44(2). <https://doi.org/10.47836/PJTAS.44.2.12>
- Zagal, E., & Zadzwaka, R. (2007). *Protocolo de Métodos de Análisis para suelos y lodos*. SAG Servicio Agrícola y Ganadero, Chile.
- Zapata, A. D. (2017). *Modelamiento estocástico de la humedad del suelo y el nivel freático en la zona bananera de Urabá* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Zhang, H., Hartge, K. H., & Ringe, H. (1997). Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1). <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010033x>

- Zhang, J., Bei, S., Li, B., Zhang, J., Christie, P., & Li, X. (2019). Organic fertilizer, but not heavy liming, enhances banana biomass, increases soil organic carbon and modifies soil microbiota. *Applied Soil Ecology*, *136*. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.017>
- Zhao, J., Wang, W., Zhou, H., Wang, R., Zhang, P., Wang, H., Pan, X., & Xu, J. (2017). Manganese toxicity inhibited root growth by disrupting auxin biosynthesis and transport in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00272>
- Zhong, S., Mo, Y., Guo, G., Zeng, H., & Jin, Z. (2014). Effect of continuous cropping on soil chemical properties and crop yield in banana plantation. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *16*(1).
- Zhong, S., Sheng, Z., Zheng, L., Zheng, X., Yang, Y., Xiao, D., Ai, B., & Zeng, H. (2021). Impacts of 25-year rotation and tillage management on soil quality in a semi-arid tropical climate. *Chilean Journal of Agricultural Research*, *81*(1). <https://doi.org/10.4067/S0718-58392021000100003>
- Zuñiga, J., Serrano, E., González, M., & Sandoval, J. (2009). El deterioro de la calidad y salud de los suelos cultivados con banano causa disminución de la productividad. En *Informe anual de investigaciones*. CORBANA S.A., San José, Costa Rica.

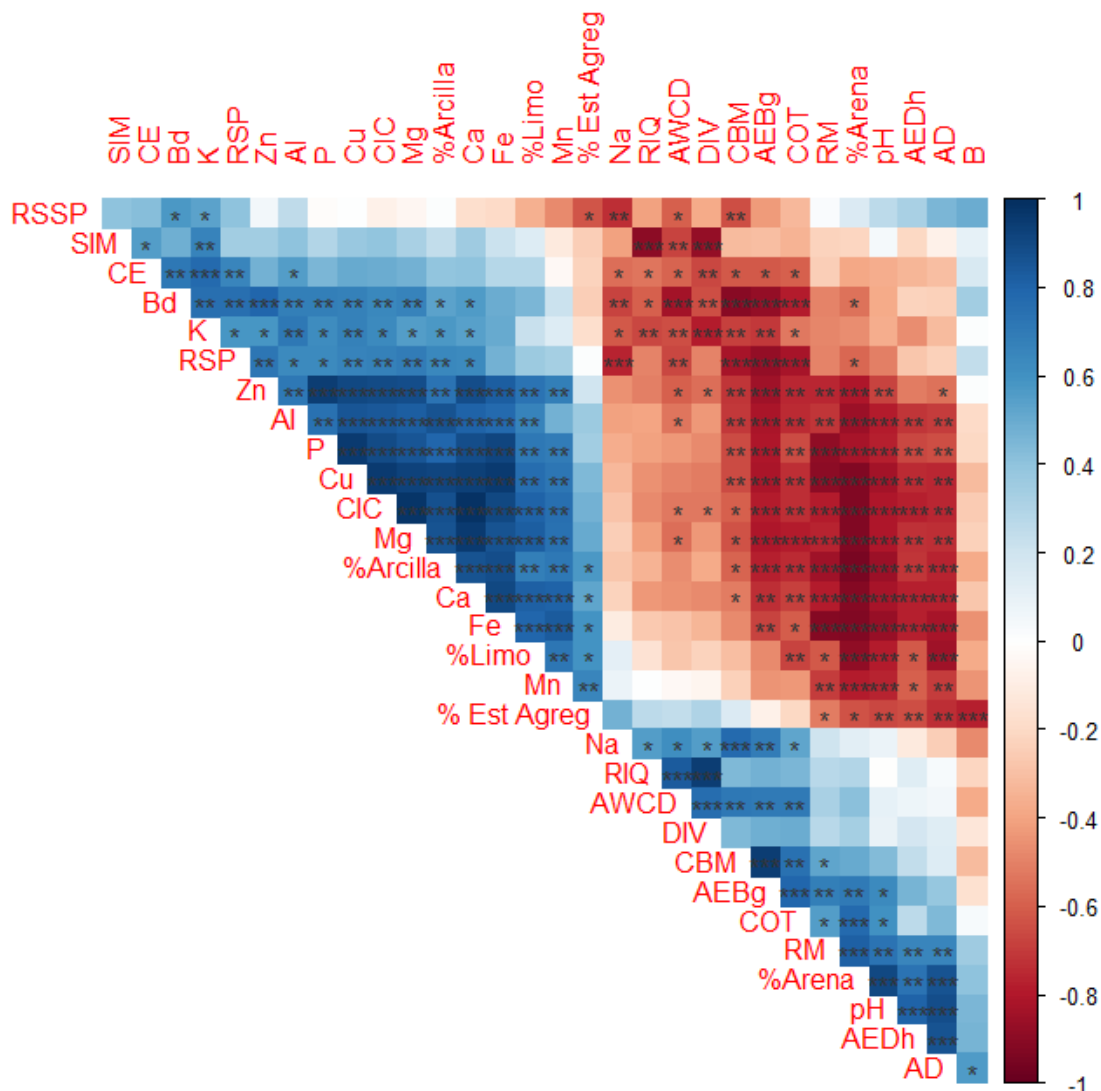
ANEXOS

Anexo 1. Relación entre los indicadores preseleccionados y las funciones y amenazas del suelo. [§]Funciones, servicios y procesos del suelo, descritos por Seybold et al. (1997), Karlen et al. (1997) y Bünemann et al. (2018). [&]Amenazas descritas por Bünemann et al. (2018).

| Indicador | Función/servicio/proceso del suelo [§] | Amenaza ^{&} |
|--|---|---|
| CIC, Ca, Mg y K (cmol (+) L ⁻¹) S, P, Fe, Mn, Zn, B, Na y Cu (mg L ⁻¹) pH y acidez intercambiable (cmol (+) L ⁻¹) | Productividad. Disponibilidad y ciclaje de nutrientes. Actividad biológica. Biodiversidad. | Erosión. Contaminación. Pérdida de materia orgánica. Pérdida de biodiversidad. Salinización |
| Conductividad eléctrica (mS cm ⁻¹) | Productividad. Disponibilidad y ciclaje de nutrientes. Actividad biológica. Biodiversidad. Ciclaje del agua. Estabilidad estructural del suelo. | Erosión. Salinización. Pérdida de biodiversidad. |
| Carbono orgánico total (%) | Productividad. Disponibilidad y ciclaje de nutrientes. Actividad biológica. Biodiversidad. Estabilidad estructural del suelo. | Erosión. Pérdida de materia orgánica. Pérdida de biodiversidad. Contaminación. |
| Densidad aparente (g cm ⁻³) | Productividad. Actividad biológica. Conductividad hidráulica. Estabilidad estructural del suelo. Biodiversidad. | Compactación. Salinización. Pérdida de materia orgánica. Erosión. Pérdida de biodiversidad. |
| Textura del suelo (% arena - % limo - % arcilla) | Productividad. Estabilidad estructural del suelo. Disponibilidad y ciclaje de nutrientes. Conductividad hidráulica. | |
| Resistencia del suelo a la penetración (MPa) | Productividad. Actividad biológica. Conductividad hidráulica. Estabilidad estructural del suelo. | |
| Estabilidad de agregados (%) | Productividad. Conductividad hidráulica. Estabilidad estructural del suelo. | |
| Agua disponible (% HV) a CC y PMP | Productividad. Actividad biológica. Conductividad hidráulica. | |
| Respiración microbiana (mg C-CO ₂ g ⁻¹ día) Carbono en la biomasa microbiana (mg C kg ⁻¹ suelo) Huella metabólica (AWCD - H' - S - E) Actividad enzimática (β-glucosidasa y Deshidrogenasa). | Productividad. Actividad biológica. Disponibilidad y ciclaje de nutrientes. Biodiversidad del suelo. | Salinización. Compactación. Pérdida de materia orgánica. Pérdida de biodiversidad. Pérdida de redes tróficas. Pérdida del microbioma del suelo. Erosión. Contaminación. |
| Estado nutricional de la planta* Indicadores biométricos** Raíz funcional (g planta ⁻¹) <i>Radopholus similis</i> (indiv 100 g ⁻¹) Nemátodos saprofitos (indiv.100 g ⁻¹) | Productividad. Disponibilidad y ciclaje de nutrientes. | Erosión. Contaminación. Pérdida de materia orgánica. Pérdida de biodiversidad. |

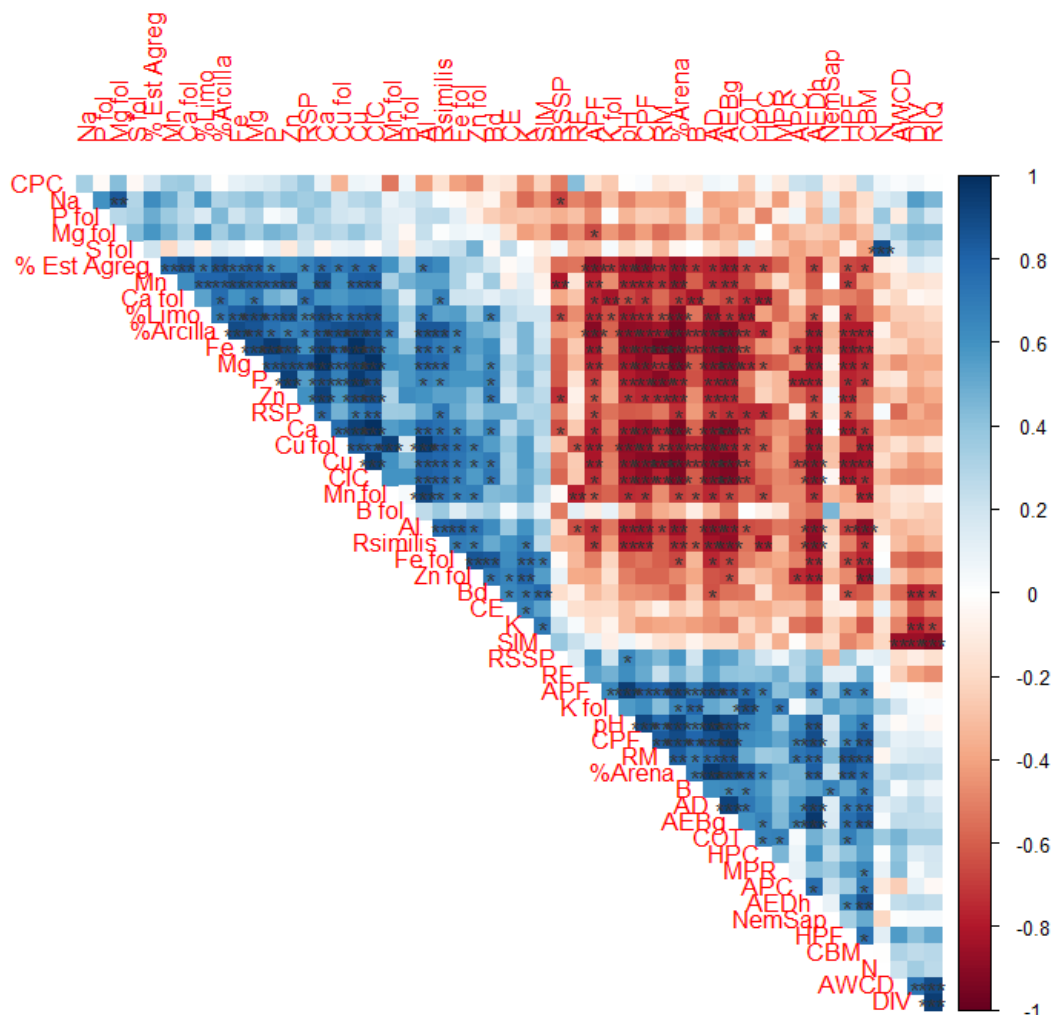
MPa = megapascales. %HV = porcentaje de humedad volumétrica. CC = capacidad de campo. PMP = punto de marchitez permanente. AWCD = Desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). H' = Índice Shannon-Wiener. S = Índice de Simpson. E = Similitud. %ebms = porcentaje en base materia seca. * Contenido de nutrientes en tejido foliar. ** Circunferencia de planta, altura de hijo, hojas por planta y manos por racimo.

Anexo 2. Matriz de correlaciones de Pearson entre los indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo en los tres sitios estudiados: bosque maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, baja productividad (BP) y alta productividad (AP). Elaborada con RStudio versión 2023.12.0.369 (Posit Team, 2023).



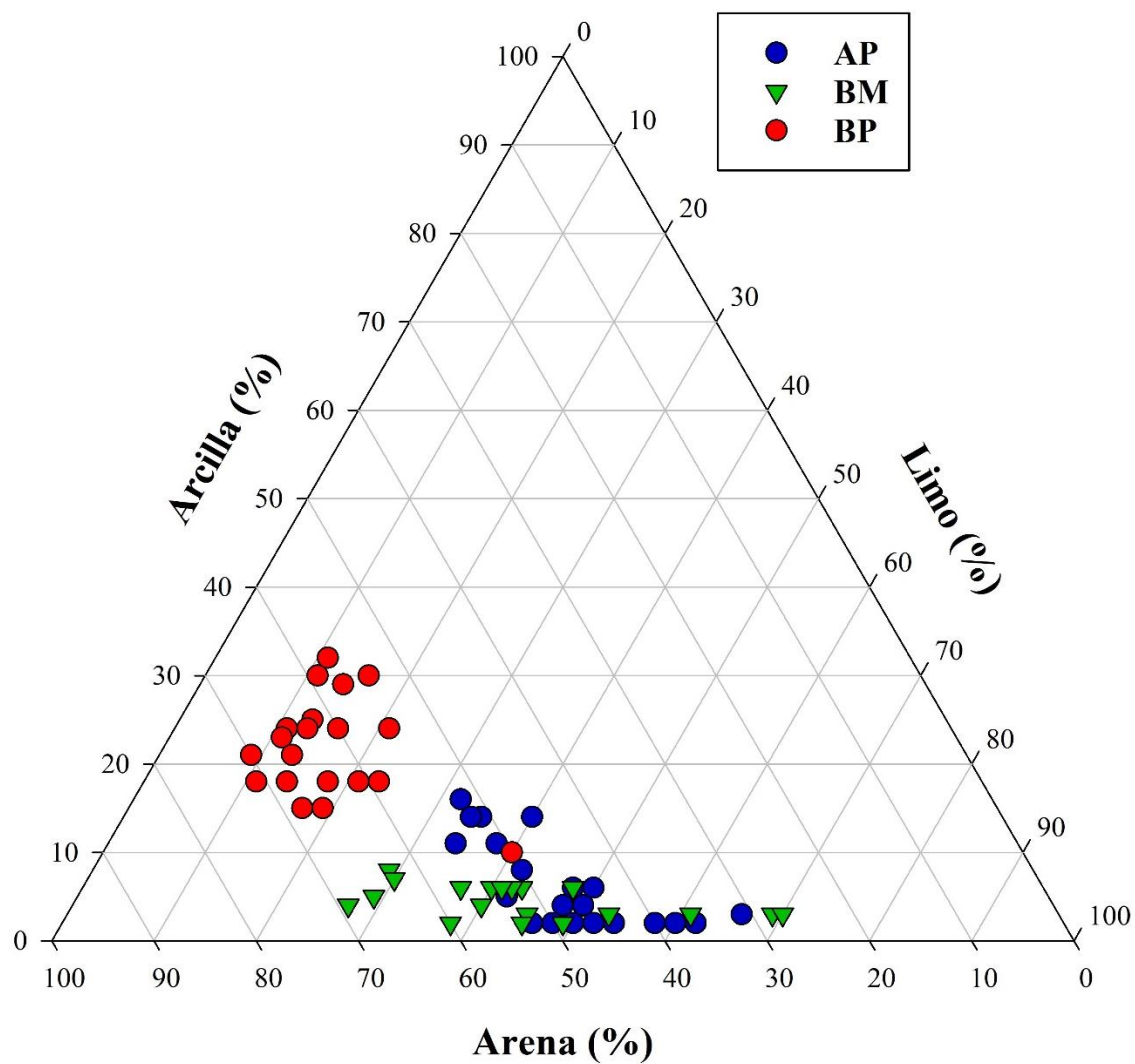
Escala de color representa magnitud del coeficiente de correlación (r). $r = 1$: correlación positiva perfecta. $r = 0$: no hay correlación. $0 < r < 1$: correlación positiva. $-1 < r < 0$: correlación negativa. Asteriscos representan significancia de la correlación: ***=0.001, **=0.05, *=0.1. Elaborado con RStudio versión 2023.12.0.369 (Posit Team, 2023). AEBg: Actividad enzimática de β -glucosidasa. AEDh: Actividad enzimática de la deshidrogenasa. AI: acidez intercambiable. CIC: capacidad de intercambio catiónica. CE: conductividad eléctrica. Na: sodio. Ca: calcio. Mg: magnesio. N: nitrógeno. K: potasio. P: fósforo. Cu: cobre. Zn: zinc. B: boro. Fe: hierro. Mn: manganeso. COT: carbono orgánico total. Bd: densidad aparente. RSP: resistencia a la penetración superficial. RSP: resistencia a la penetración subsuperficial. Est. Agreg: estabilidad de agregados. AD: agua disponible (% HV). RM: respiración microbiana. CBM: carbono de la biomasa microbiana. AWCD: desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). DIV(H'): índice Shannon-Wiener. RIQ(S): riqueza, índice de Simpson. SIM (E): similitud.

Anexo 3. Matriz de correlaciones de Pearson entre los indicadores químicos, físicos, biológicos del suelo, biométricos y relacionados con el estado nutricional y sistema radical de la planta, en los tres sitios estudiados: bosque maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, baja productividad (BP) y alta productividad (AP). Elaborada con RStudio versión 2023.12.0.369 (Posit Team, 2023).

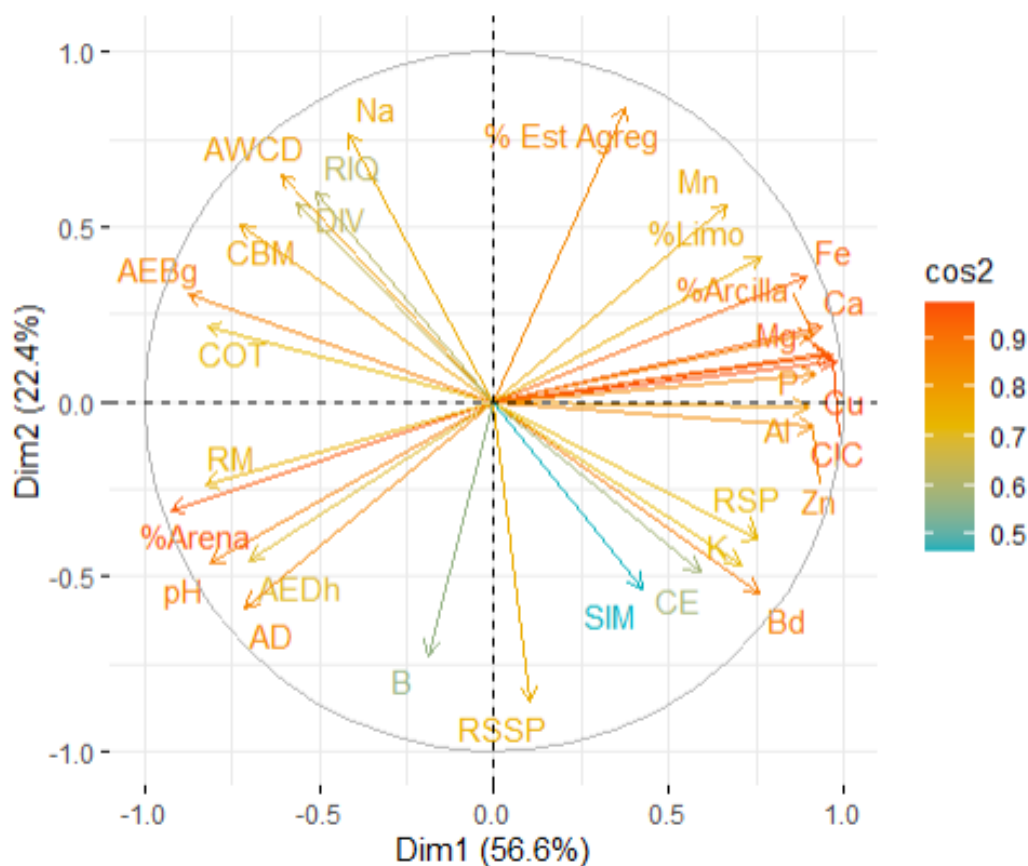


Escala de color representa magnitud del coeficiente de correlación (r). $r = 1$: correlación positiva perfecta. $r = 0$: no hay correlación. $0 < r < 1$: correlación positiva. $-1 < r < 0$: correlación negativa. Asteriscos representan significancia de la correlación: ***= 0.001 , **= 0.05 , *= 0.1 . Elaborado con RStudio versión 2023.12.0.369 (Posit Team, 2023). AEBg: Actividad enzimática de β -glucosidasa. AEDh: Actividad enzimática de la deshidrogenasa. AI = acidez intercambiable. CIC: capacidad de intercambio catiónica. CE: conductividad eléctrica. Na: sodio. Ca: calcio. Mg: magnesio. N: nitrógeno. K: potasio. P: fósforo. Cu: cobre. Zn: zinc. B: boro. Fe: hierro. Mn: manganeso. COT: carbono orgánico total. Bd : densidad aparente. RSP: resistencia a la penetración superficial. RSSP: resistencia a la penetración superficial. Est. Agreg: estabilidad de agregados. AD: agua disponible (% HV). RM: respiración microbiana. CBM: carbono de la biomasa microbiana. AWCD: desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). DIV(H'): índice Shannon-Wiener. RIQ(S): riqueza, índice de Simpson. SIM (E): similitud. APF: Altura de hijo edad floración. CPF: Circunferencia de planta edad floración. HPF: Hojas por planta edad floración. APC: Altura de hijo edad cosecha. CPC: Circunferencia de planta edad cosecha. HPC: Hojas por planta edad cosecha. MPR: Manos por racimo. RF: raíz funcional. *R.similis* : *Radopholus similis*. NemSap: nematodos saprófitos. %ebms: porcentaje en base materia seca. fol + nutriente: concentración del nutriente en tejido foliar. N: nitrógeno. P: fósforo. K: potasio. Ca: calcio. Mg: magnesio. S: azufre. Fe: hierro. Mn: manganeso. Zn: zinc. Cu: cobre. B: boro.

Anexo 4. Triángulo de textura de los suelos en los tres sitios estudiados: bosque maduro (BM) y dos condiciones de producción de banana, baja productividad (BP) y alta productividad (AP). Elaborado con RStudio versión 2023.12.0.369 (Posit Team, 2023).

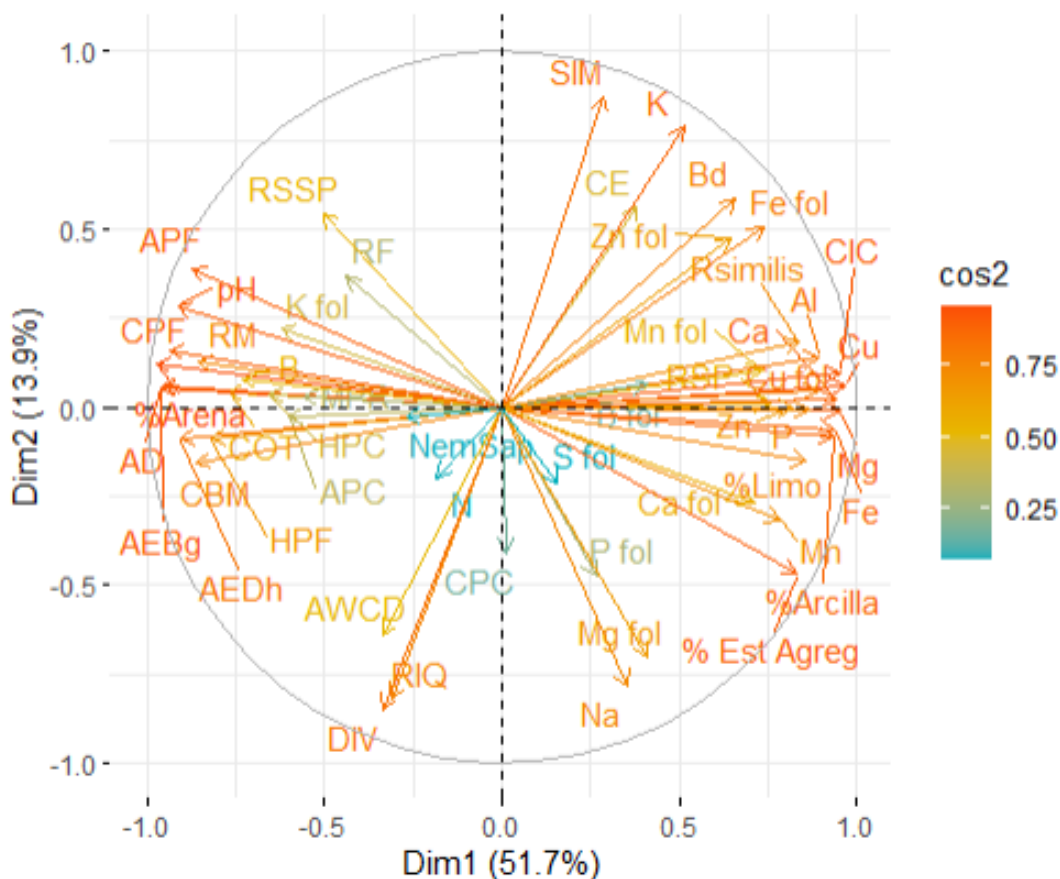


Anexo 5. Biplot del análisis de componentes principales (PCA) realizado a los indicadores químicos, físicos, biológicos del suelo en los tres sitios estudiados: bosque maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, baja productividad (BP) y alta productividad (AP). Intensidad de color (cos2) representa la calidad de la representación de cada indicador en el mapa de factores. Elaborado con RStudio versión 2023.12.0.369 (Posit Team, 2023).



AEBg: Actividad enzimática de β -glucosidasa. AEDh: Actividad enzimática de la deshidrogenasa. AI: acidez intercambiable. CIC: capacidad de intercambio catiónica. CE: conductividad eléctrica. Na: sodio. Ca: calcio. Mg: magnesio. N: nitrógeno. K: potasio. P: fósforo. Cu: cobre. Zn: zinc. B: boro. Fe: hierro. Mn: manganeso. COT: carbono orgánico total. Bd: densidad aparente. RSP: resistencia a la penetración superficial. RSSP: resistencia a la penetración subsuperficial. Est. Agreg: estabilidad de agregados. AD: agua disponible (% HV). RM: respiración microbiana. CBM: carbono de la biomasa microbiana. AWCD: desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). DIV(H'): índice Shannon-Wiener. RIQ(S): riqueza, índice de Simpson. SIM (E): similitud.

Anexo 6. Biplot del análisis de componentes principales (PCA) realizado a los indicadores químicos, físicos, biológicos del suelo, además de los biométricos y relacionados con el estado nutricional y sistema radical de la planta, en los tres sitios estudiados: bosque maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, baja productividad (BP) y alta productividad (AP). Intensidad de color (cos2) representa la calidad de la representación de cada indicador en el mapa de factores. Elaborado con RStudio versión 2023.12.0.369 (Posit Team, 2023).



AEBg: Actividad enzimática de β -glucosidasa. AEDh: Actividad enzimática de la deshidrogenasa. AI = acidez intercambiable. CIC: capacidad de intercambio catiónica. CE: conductividad eléctrica. Na: sodio. Ca: calcio. Mg: magnesio. N: nitrógeno. K: potasio. P: fósforo. Cu: cobre. Zn: zinc. B: boro. Fe: hierro. Mn: manganeso. COT: carbono orgánico total. Bd: densidad aparente. RSP: resistencia a la penetración superficial. RSSP: resistencia a la penetración subsuperficial. Est. Agreg: estabilidad de agregados. AD: agua disponible (% HV). RM: respiración microbiana. CBM: carbono de la biomasa microbiana. AWCD: desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). DIV(H'): índice Shannon-Wiener. RIQ(S): riqueza, índice de Simpson. SIM (E): similitud. APF: Altura de hijo edad floración. CPF: Circunferencia de planta edad floración. HPF: Hojas por planta edad floración. APC: Altura de hijo edad cosecha. CPC: Circunferencia de planta edad cosecha. HPC: Hojas por planta edad cosecha. MPR: Manos por racimo. RF: raíz funcional. *R.similis* : *Radopholus similis*. NemSap: nematodos saprófitos. %ebms: porcentaje en base materia seca. fol + nutriente: concentración del nutriente en tejido foliar. N: nitrógeno. P: fósforo. K: potasio. Ca: calcio. Mg: magnesio. S: azufre. Fe: hierro. Mn: manganeso. Zn: zinc. Cu: cobre. B: boro.