

ACTIVIDAD BIOLÓGICA DE LA POBLACIÓN MICROBIANA ASOCIADA A LA RIZOSFERA DE *Saccharum officinarum* L

BIOLOGICAL ACTIVITY OF THE MICROBIAL POPULATION ASSOCIATED WITH THE RHIZOSPHERE OF *Saccharum officinarum* L

Mónica Tamayo-Isaac¹ <http://orcid.org/0000-0002-2981-6172>
Dolores del Rosario Piñón-Gómez² <http://orcid.org/0000-0001-9620-3723>
Yaquelín Puchades-Izaguirre¹ <http://orcid.org/0000-0001-6608-4997>
Pablo D. Pablos-Reyes¹ <http://orcid.org/0000-0003-1820-0142>
Rosa María Pérez-Silva^{3*} <http://orcid.org/0000-0002-9878-7192>

¹Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Santiago de Cuba, Cuba

²Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Cuba-INICA, La Habana, Cuba

³Centro de Estudio de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

*Autor para correspondencia: rperezs@uo.edu.cu

Recibido: 14 de mayo de 2024

Aprobado: 1 de septiembre de 2024

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue determinar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la respiración de la población microbiana asociada a la rizosfera de *Saccharum officinarum* L. En experimento de larga duración, Umln_6, plantado con *Saccharum officinarum* L., y seis niveles de nitrógeno, ubicado en la provincia Santiago de Cuba. Se determinó la respiración microbiana, mediante valoraciones químicas en medio cerrado, el rendimiento agrícola y la interacción con variables químicas y meteorológicas del ecosistema. Los datos se procesaron por análisis de varianza factorial, modelo AMMI y ACP. La variable respiratoria tuvo un comportamiento diferencial para los niveles de N aplicados y la fenología del cultivo, además de la influencia de estos factores sobre las propiedades químicas del suelo que alcanza su valor máximo con una dosis promedio de N, de 100,6 kg.ha⁻¹. Los resultados indican que la evaluación de las interacciones caña de azúcar-microorganismos del suelo puede ser útil para un mejor manejo de la fertilización nitrogenada.

Palabras clave: propiedades químicas del suelo; fertilización nitrogenada; respiración microbiana, *Saccharum officinarum* L.

ABSTRACT

The objective of this work was to determine the effect of nitrogen fertilization on the respiration of the microbial population associated with the rhizosphere of *Saccharum officinarum* L. The quantities of soil microorganisms as an expression of its quality, allow establishing relationships with its chemical properties, by determining microbial respiration. In a long-term experiment, Umln_6, planted with *Saccharum officinarum* L., and six levels of nitrogen, planted in Santiago of Cuba province. The microbial respiration was determined through chemical assessments in a closed environment, agricultural yield and the interaction with chemical and meteorological variables of the ecosystem. The data were processed by factorial variance analysis, AMMI model and PCA. The respiratory variable had a differential behavior for the levels of N applied and the phenology of the crop, in addition to the influence of these factors on the chemical properties of the soil that reaches its maximum value with an average dose of N, of 100,6 kg.ha⁻¹. The results indicate that the evaluation of sugarcane-soil microorganism interactions can be useful for better management of nitrogen fertilization.

Keywords: soil chemical properties; nitrogen fertilization; microbial respiration; *Saccharum officinarum* L.

INTRODUCCIÓN

Las comunidades microbianas son esenciales en la productividad de los agroecosistemas, están involucradas en una serie de servicios ecosistémicos y modulan el ciclo de nutrientes e interacciones simbióticas y patógenas con las plantas. Los microorganismos están implicados en el crecimiento y la salud de las plantas. La microbiota se refiere a la comunidad de microorganismos vivos residentes en un nicho ecológico determinado. Varios tipos de bacterias y hongos mejoran la estructura del suelo, contribuyen a la formación de agregados y poros, también juegan un papel clave en el incremento de la fertilidad del suelo.^(1,2)

Bolat expresa que la determinación de la respiración microbiana del suelo, como método cuantitativo, indica la cantidad de microorganismos de este y su calidad. Las emisiones de CO₂ y los atributos del suelo se ven afectados por diferentes factores de una manera compleja.⁽³⁾

La aplicación de fertilizantes inorgánicos nitrogenados resulta necesaria para la obtención de altos rendimientos en la caña de azúcar. Sin embargo, la calidad biológica del suelo, también influye en el logro de manejos agronómicos eficientes en los agroecosistemas cañeros. La diversidad microbiana del suelo es en extremo sensible a la fertilización, que es una de las principales acciones antropogénicas asociadas a cambios globales.⁽⁴⁾

Autores como, Olivares *et al.*, consideraron la respiración microbiana, como índice de productividad del suelo. Los indicadores biológicos han tomado fuerza debido a su mayor sensibilidad y rapidez de respuesta frente a las perturbaciones y/o variables introducidas en el ecosistema suelo y, sobre todo, por su carácter integrador.⁽⁵⁾

Las poblaciones microbianas del suelo pueden responder rápidamente a cambios introducidos en el sistema ocasionado por las prácticas de manejo por lo que son indicadores adecuados para mejorar la eficiencia en las aplicaciones de fertilizantes. Diversos estudios, indican que un exceso de fertilización nitrogenada tiene repercusiones en el ambiente. La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) tiene relación estrecha con el uso excesivo de fertilizantes amoniacales como la urea, ya que estos aumentan la emisión de amoníaco (NH₃), nitrógeno molecular (N₂) y óxido nitroso (N₂O). Los fertilizantes nitrogenados, requieren de un uso racional para la protección ambiental; el nitrógeno no aprovechado por el sistema

suelo-plantas, contamina el agua, con altos tenores de nitratos en el manto freático y también en la atmósfera. De esta manera, se agudiza el efecto invernadero y el deterioro de la capa de ozono. El óxido nitroso es producido por microorganismos del suelo por denitrificación.⁽⁶⁾

De esta manera, el desequilibrio en las comunidades microbianas del suelo desencadena procesos de degradación biológica, se reduce el rendimiento/calidad de los cultivos, al aumentar la vulnerabilidad ante diversos tipos de estrés y limita la capacidad de llevar a cabo sus principales servicios ecosistémicos, tales como: producción de biomasa vegetal, almacenamiento y reciclaje de nutrientes, almacenamiento y filtrado de agua, regulación de clima e inundaciones, mitigación del cambio climático y hábitat para la actividad biológica.⁽⁷⁾

La fertilización se ha utilizado ampliamente como una práctica de manejo común para mantener la productividad de los cultivos. El uso por un término prolongado de fertilizantes minerales en combinación con fertilizantes orgánicos, enriquece y diversifica el microbioma del suelo y aumenta la actividad de las enzimas.⁽⁸⁾ En este contexto, el uso de diferentes sistemas de fertilización, a largo plazo, puede generar disímiles condiciones sobre la actividad vital de los principales grupos taxonómicos y fisiológicos de los microorganismos del suelo.^(9,10)

Por las razones anteriores, el objetivo principal de este trabajo fue determinar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la respiración de la población microbiana asociada a la rizosfera de *Saccharum officinarum* L, sobre el cultivar C86-12.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de la microbiota se realizó en los laboratorios de fitopatología, de Suelo, Agua y Tejido Vegetal, del Instituto de investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA) en Santiago de Cuba. Se determinó la respiración microbiana, (mg/CO₂ en 50 g de suelo), parámetro microbiológico, indicador de las cantidades de microorganismos del suelo y su calidad. Los resultados obtenidos para la variable en estudio, se relacionaron con las propiedades químicas y físicas del suelo: temperatura, precipitaciones, algunos componentes del rendimiento industrial (Brix, Pol y Pureza) y el rendimiento agrícola del cultivo, mediante, correlación de Spearman, Análisis de Componentes Principales (ACP), y se obtuvo una matriz de correlación.

Perfil natural del sitio experimental

El experimento UImn-6 forma parte de la base experimental del proyecto “Red de experimentos de larga duración con fines de evaluación, diagnóstico y evolución de la fertilidad, en los principales suelos donde se cultiva la caña de azúcar en Cuba”. Las actividades del proyecto fueron aprobadas para su desarrollo por el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, y se ejecutan desde 1998.

Está localizado en el Bloque Experimental del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Santiago de Cuba, (INICA Santiago de Cuba) a 300 m al norte de la tarja que marca el km 921 de la Carretera Central Habana-Santiago de Cuba, en las coordenadas lat. 20.393 N; long. 76.018E), próximo al poblado del Central Dos Ríos.⁽¹¹⁾

El suelo del estudio es Pardo Sialítico, según Hernández *et al.*, monocultivado con caña de azúcar bajo diferentes dosis de fertilizantes nitrogenados.⁽¹²⁾

El estudio reprodujo el sistema de cultivo tradicional de caña de azúcar, utilizado en Cuba con plantación y cosecha manual, así como ciclos de reposición luego de cinco cortes. Al momento del presente estudio, se encontraba en su tercer ciclo y cepa segundo retoño, plantado con el cultivar C86-12.

Diseño experimental

Para realizar este estudio, del experimento Umln_6 de bloques completamente al azar, se seleccionaron las parcelas correspondientes a diferentes niveles de fertilización nitrogenada (tabla 1).

Tabla 1- Tratamientos: control sin fertilizar y niveles de nitrógeno con fondo fijo de fósforo y potasio

Tratamiento	Dosis de nutrimento (kg ha ⁻¹).			Características de las muestras
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
T1	0	0	0	Control
T2	0	25	50	Nula aplicación de nitrógeno
T3	50	25	50	Baja aplicación de N
T4	100	25	50	Media aplicación de N
T5	150	25	50	Alta aplicación de N
T6	200	25	50	Muy alta aplicación de N

Las parcelas quedaron conformadas por cuatro surcos o hileras de 7,5 m de longitud, separadas a 1,60 m, con un área neta de 48 m². La aplicación de los

fertilizantes, en la cepa de caña planta, se realizó en el fondo del surco previo a la plantación. En retoño se efectuó antes de los veinte días posteriores a la cosecha, en un zanjillo previamente abierto con un implemento adecuado y regulado para tal fin a 15-20 cm de profundidad, una distancia de 35-40 cm del centro de la cepa, a un solo lado del surco, alternando en cada cosecha (años nones a la izquierda y pares a la derecha). Inmediatamente después de aplicado el fertilizante de forma manual y sin fraccionamiento de dosis, se tapó con una cultivadora de discos múltiples o tape manual con azadón.

Los portadores de los nutrientes utilizados fueron: nitrógeno (Urea-N,46 % (min)) con humedad

5-6 % (máx.), grado fertilizante, granular de 5mm; solubilidad 108 partes por 100 partes de agua,

a 20 °C, pH, 8-9. El fósforo (superfosfato triple -46 % P₂O₅) fósforo asimilable como P₂O₅ 46 %; Humedad Crítica Relativa (HCR) 82,5 %, (baja higroscopicidad), humedad como agua 1,20 % máximo.

Potasio (cloruro de potasio-60 % K₂O), con potasio (K₂O) 60 %, cloruro (Cl) 46,7 %

cloruro de potasio (KCl) 9,1 %, granulometría 2 a 4,00 mm, solubilidad en agua (20 °C) 34.20 g/100 mL de agua, densidad aparente 1 025-1 200 (kg/m³), pH en solución 5,4 a 10, y acidez equivalente a carbonato de calcio neutro, Índice de salinidad 116,3, con humedad relativa crítica 84 % a 30 °C.

La conducción del experimento, se realizó siguiendo las Normas Metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar.⁽¹²⁾ Para el análisis del efecto

continuado de la aplicación de fertilizantes, el Instituto de Investigaciones de la Caña de azúcar de Cuba (INICA) estableció experimentos denominados de “larga duración”, en los que se ha mantenido por muchos años (60 y 30) aplicaciones sucesivas de las mismas dosis de nutrientes. Estos estudios proporcionan información importante sobre la sostenibilidad de los sistemas agrícolas; perfeccionan el SERFE sobre la base del estudio de las variaciones en los rendimientos en interacción con el ambiente, las pérdidas de nutrientes, los cambios en la materia orgánica y acidez del suelo, entre otros.

Joris *et al.*, demostraron que la fertilización con N a largo plazo aumenta la contribución de este nutriente del suelo, y reduce la contribución de N de los fertilizantes.⁽¹³⁾

Estudios realizados por Murillo *et al.*, consideraron que, las poblaciones microbianas del suelo pueden responder rápidamente a cambios introducidos en el sistema ocasionado por las prácticas de manejo, por lo

que son indicadores adecuados para mejorar la eficiencia en las aplicaciones de fertilizantes.⁽¹⁴⁾

Se ha destacado en numerosos estudios, la importancia de usar bioindicadores a nivel de especies de microorganismos para el monitoreo de la fertilidad del suelo, según plantea Li *et al.*⁽¹⁵⁾ El estudio de la microbiota y el microbioma del suelo en relación con la fertilización nitrogenada en caña de azúcar en Cuba, contribuirá al desarrollo de estrategias encaminadas a mejorar la eficiencia de la nutrición del cultivo, al incorporar nuevos criterios basados sobre variables biológicas; de esta manera se incrementa el conocimiento sobre el papel de los microorganismos del suelo sobre la fertilidad de este, así como sobre la nutrición y salud de las plantas.

Determinación de la respiración microbiana

Las evaluaciones de la respiración microbiana, se realizaron en tres momentos, que se hicieron coincidir con tres de las etapas fenológicas del cultivo. Se realizaron las mismas a los cuatro meses (etapa de macollamiento M1), ocho meses (etapa de crecimiento M2) y doce meses (etapa de maduración M3). Para ello, en cada momento y con una barrena, a la profundidad de 0 a 20 cm, se tomó una muestra compuesta, por cinco submuestras, en cinco puntos, en forma de sobre cerrado, por cada parcela, las que fueron mezcladas para formar una muestra única de 1 kg de suelo por tratamiento. Se usaron guantes estériles para el muestreo de suelo en cada una de las parcelas y los instrumentos utilizados se desinfectaron con formol al 5 %. El suelo rizosférico extraído se mezcló en una bandeja estéril, se secó a temperatura ambiente, se pasó por rodillo y se tamizó. Luego, la muestra de suelo se dividió en dos submuestras: una para determinar la respiración microbiana y otra para analizar las propiedades químicas y físicas de este.

Al momento del muestreo, se midió la temperatura y humedad del suelo a la misma profundidad, con un higrómetro IMIKO®, de procedencia japonesa. Estos valores se registraron para la superficie de suelo, también a una profundidad de 20 cm.

Adicionalmente, se tomaron los datos de otras variables meteorológicas: precipitaciones del mes anterior a la toma de muestras, lluvia acumulada durante la fase fenológica analizada y temperatura

media de la misma. Además, se determinaron los grados días correspondientes a cada fase.

Las mediciones de la respiración microbiana (R) se realizaron en el laboratorio de Fitopatología del INICA Santiago de Cuba, y se utilizó el método de incubación en medio cerrado inducida por sustrato.⁽¹⁶⁾

Se evaluaron cuatro réplicas por cada tratamiento.

En frascos plásticos con tapas, se adicionaron 50 g de suelo, humedecidos hasta el 50 % de la capacidad total de retención de agua (CTR-H₂O), y 1 g de sacarosa. En el interior de los frascos y encima de las muestras de suelo, se ubicaron tubos de ensayos de 20 mL, con 5 mL de solución colectora de NaOH 1 mol.L⁻¹, marca Merck, con densidad 1,04 g/cm³ (20 °C), con valor de pH de 13,7. Se prepararon cuatro recipientes controles por cada tratamiento (blancos) sin adición sacarosa. Los tubos se incubaron a 30 °C.⁽¹⁷⁾

Los frascos se abrieron cada 24 h durante nueve días de estudio, para poner una nueva solución colectora, y la extraída se depositó en Erlenmeyer de 100 mL. Se le agregó 3 mL de BaCl₂ 0,5 mol.L⁻¹ para facilitar la precipitación de los carbonatos, y tres gotas de fenoftaleína al 1 %; posteriormente, esta solución se valoró con HCl 1 mol.L⁻¹.

La respiración microbiana, se determinó según la ecuación (1):

$$R = (B - M) * 2,2 \quad (1)$$

donde:

R = respiración microbiana (mg /CO₂).

B = volumen de HCl necesario para titular el NaOH del promedio de los blancos (mL).

M = cantidad de HCl necesario para titular el NaOH de la muestra (en mL).

2,2 es un factor (mL de ácido gastado equivalentes a 2.2 mg de CO₂).

La respiración microbiana acumulada, resultó de la suma de las respiraciones diarias obtenidas durante nueve días de estudio.

Análisis químicos y químico-físicos del suelo

Las muestras de suelo fueron preparadas y analizadas en el laboratorio de Análisis Químico de Suelo, agua y Tejido Vegetal de INICA, Santiago de Cuba. Las propiedades químicas del suelo (tabla 2), se determinaron según las normas metodológicas del departamento de Suelos y agroquímica del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar.⁽¹⁸⁾

Tabla 2- Variables físico-químicas del suelo y métodos para su determinación

Variable	Unidad de medición	Método
pH en agua y KCl	- log [H ⁺];	Método potenciométrico, relación suelo: solución 1:2.5
Materia orgánica del suelo (MOS)	%	Método colorimétrico de Walkey-Black, digestión con H ₂ SO ₄ , K ₂ Cr ₂ O ₇ 1N (ox.) y FeSO ₄ .7 H ₂ O 0,5 N (red.), utilizando el factor (1.724) de Vam Bommen, para convertir el carbono en materia orgánica.
Fósforo asimilable	P ₂ O ₅ mg.100g ⁻¹	Método de Oniani, extracción con H ₂ SO ₄ 0,1 N, relación suelo: solución 1:2.5, determinando, colorimetría.
Potasio asimilable	K ₂ O mg.100g ⁻¹	Método de Oniani, extracción con H ₂ SO ₄ 0,1 N, relación suelo: solución 1:2.5, por fotometría de llama.
Bases intercambiables (K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ²⁺)	cmol [;+];.kg ⁻¹	Extracción con NH ₄ OAc 1 N a pH 7, determinando calcio y magnesio por valoración con EDTA, el sodio y potasio por fotometría de llama.

Determinación del rendimiento industrial y sus componentes

La producción de tallos de cada parcela, se determinó por pesaje directo, con el uso de un dinamómetro acoplado a un dispositivo en el tractor, estimándose así la variable rendimiento (t. ha⁻¹ de tallos). Para las determinaciones de los componentes del rendimiento industrial se evaluaron: Brix (%), Pol en jugo (%) y Pureza (%), siguiendo lo descrito en el *Manual de procedimientos de métodos analíticos para azúcar crudo*.⁽¹⁹⁾

Procesamiento estadístico realizado a los datos

Mediante las pruebas de Chí Cuadrado y Bartlett-Box F, se comprobó la normalidad y homogeneidad de la varianza de los datos originales de todas las variables analizadas, y no fue necesario realizar su transformación. Se realizó análisis de varianza factorial para determinar el efecto de las dosis de N, las etapas fenológicas (momento de muestreo) y sus interacciones sobre la respiración microbiana acumulada. Después de comprobar la significación en las interacciones, se aplicó un modelo AMMI según Brauncount *et al.*, para lograr mejor comprensión de dicha interacción.⁽²⁰⁾ La respiración microbiana se consideró como genotipo, y las fases fenológicas del cultivo, como ambiente. Se realizó análisis de correlación de Pearson (simple) ($p < 0,05$) para determinar la correlación entre las variables: (i) respiración microbiana y dosis de nitrógeno, (ii) respiración microbiana y las variables meteorológicas, medidas en el momento del muestreo, tales como, temperatura_superficie-suelo, temperatura_20 cm de profundidad del suelo, HR_superficie-suelo, HR_20 cm de profundidad del suelo, y las que caracterizaron las fases fenológicas del cultivo temperatura en cada

fase fenológica del cultivo, grados-días, lluvias-mes, y lluvia-acumulada, además de (iii) rendimiento agrícola y dosis de nitrógeno.

Se obtuvo la dosis de nitrógeno para la cual se alcanza el máximo de respiración microbiana por etapa fenológica del cultivo, mediante análisis de regresión simple según el criterio de la segunda derivada. Se correlacionaron las variables respiración microbiana y rendimiento agrícola del cultivo.

Los datos correspondientes a las variables meteorológicas desde mayo 2022 hasta febrero 2023, fueron aportados por la estación meteorológica ubicada en las áreas experimentales de INICA Santiago de Cuba.

Se realizó Análisis de Componentes Principales, con los datos de las variables físico-químicas y químicas del suelo, el rendimiento agrícola por parcela y las variables meteorológicas con el objetivo de reducir dimensionalidad y determinar para cada dimensión o componentes el aporte de cada variable; las de mayor aporte a las interacciones suelo-caña de azúcar-microorganismos Para realizar el ANOVA factorial que justificó la aplicación del modelo AMM, se utilizó el paquete estadístico STATISTICA versión 8.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 3, ilustra el efecto de los tratamientos (niveles de nitrógeno) y etapas fenológicas del cultivo en caña de azúcar, sobre la respiración microbiana y su interacción. El análisis de varianza factorial para la variable respiración microbiana (mg CO₂), parámetro indicador de la cantidad de microorganismos activos en el suelo, detectó diferencias altamente significativas entre tratamientos, fases fenológicas del cultivo (macollamiento, crecimiento y maduración), y la interacción entre ambos factores.

Tabla 3- Efecto de los tratamientos con diferentes niveles de N y fases fenológicas de la caña de azúcar sobre la respiración microbiana y las interacciones entre ambos

	SC	GL	CM	F	p
Dosis	6 850,16	4	1 712,54	482,73	***
Fases	3 580,76	2	1 790,38	504,68	***
Dosis*Fases	1 548,34	8	193,54	54,56	***
Observ	7,50	3	2,50	0,71	0,55
Dosis	6 850,16	4	1 712,54	482,73	

Leyenda: *SS_Suma de Cuadrados, GL_Grados de Libertad, MS_Cuadrados Medios, F_Significación* *** $p < 0,01$.

Existió una respuesta diferencial de la respiración microbiana acumulada por niveles de N y etapas fenológicas del cultivo. La mayor fuente de variación correspondió a los tratamientos. La existencia de diferencias altamente significativas para la variable respiración microbiana por tratamientos de N y fases fenológicas del cultivo, justifica la aplicación del modelo AMMI (figura 1), para explicar dicha interacción.

La representación gráfica Biplot, muestra una tendencia a la obtención de mejores valores de respiración microbiana en la fase fenológica de macollamiento, para el control y el tratamiento 200 kg.ha⁻¹; comportamiento similar se muestra en la fase de maduración. Los tratamientos de 50 y 150 kg.ha⁻¹, y dosis de 100 kg.ha⁻¹ favorecen el incremento de la variable en estudio, en la fase fenológica del crecimiento. Por otro lado, los mayores valores para la respiración microbiana se observaron en la etapa de maduración de la caña de azúcar, lo cual coincide con lo planteado por Oliveros, en relación con los factores de mayor incidencia en la exudación de compuestos por las raíces de las plantas. Se señaló, que la fenología, y las aplicaciones de nutrientes, se encuentran dentro de los factores que afectan el proceso de exudación de las raíces; en estados tempranos de desarrollo de las plantas, los niveles de concentración de ácidos fenólicos e hidroxiaminas, son mayores, con diferencias entre plantas jóvenes y maduras; rasgos fisiológicos, tales como, la capacidad de distribución de carbono asimilado por la raíz hacia el tallo, marcan la diferencia, en la etapa de maduración. Las raíces exudan azúcares y polisacáridos simples, aminoácidos, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos, con actividades y funciones demostradas.⁽²²⁾

La aplicación de fertilizantes nitrogenados influye en la nutrición y calidad de las plantas. Los resultados obtenidos demuestran que existen variaciones en los valores respiratorios, al aplicar diferentes dosis de nitrógeno unido a la influencia que ejercen las etapas fenológicas del cultivo, aspecto que se relaciona con

los exudados de las raíces de las plantas en cada etapa del desarrollo del cultivo. De Souza *et al.* expresaron que, en la caña de azúcar, las etapas de desarrollo de la planta tienen poco efecto sobre la estructura de la comunidad bacteriana, pero tienen un efecto significativo sobre la comunidad fúngica en las raíces. La diversidad microbiana presente en el suelo, coloniza los órganos de la planta en las primeras etapas de su desarrollo, y la riqueza y abundancia específicas están dictadas por la interacción planta-microbio funcional o adaptativa. De esta manera, también se justifica la interacción demostrada entre las dosis de nitrógeno y las fases fenológicas obtenidas en la dinámica de la respiración microbiana por etapas fenológicas del cultivo.⁽²³⁾

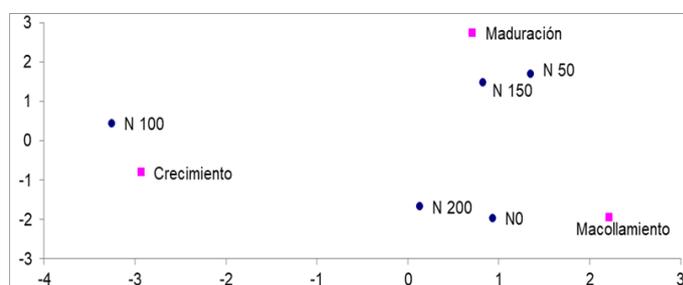


Fig. 1 - Representación Biplot, AMMI del nivel de respuesta de los tratamientos por etapas fenológicas del cultivo

Leyenda. N-Dosis de nitrógeno

Yuan *et al.*, plantearon que la rizosfera está sujeta a la influencia de las sustancias químicas excretadas por las raíces de las plantas y la comunidad microbiana en esta microzona. Su dominio varía según la morfología y las diferentes etapas de las plantas. Los cambios en la estructura de la comunidad microbiana de la rizosfera tienen un impacto importante en la circulación de sustancias y energía en el suelo, la descomposición y síntesis de materia orgánica, etcétera.⁽²⁴⁾

Smith *et al.* señalaron, que las actividades fisiológicas de los microbios de la rizosfera tienen efectos obvios sobre las propiedades del suelo, la absorción de nutrientes de las plantas y el crecimiento y desarrollo de las mismas.⁽²⁵⁾ La población de microbios de la

rizosfera también está relacionada con la salud de las plantas, y afecta, en gran medida, el rendimiento y la calidad de los cultivos.⁽²⁶⁾

Schultz *et al.* Demostraron, que la fertilización con N es una fuente importante de nutrición en la fase inicial de crecimiento, y hasta el 40 % del N proviene de la fertilización durante esta etapa, mientras que en la fase de maduración solo el 10 % del N proviene de la fertilización.⁽²⁷⁾

Las interacciones planta-microorganismos a través de la rizointeracción, según Oliveros, influyen en el crecimiento de las plantas, mediante mecanismos, tales como aumento en la fijación de nitrógeno atmosférico por protobacterias, incremento de la tolerancia al estrés biótico y abiótico por la presencia de microbios endofíticos, y ventajas directas o indirectas por la presencia de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en plantas.⁽²²⁾

El análisis de la dinámica de la respiración microbiana en función de las dosis de nitrógeno muestra una respuesta polinómica de segundo orden en todas las etapas fenológicas del cultivo de la caña de azúcar, con una regresión moderada o fuerte (figura 2).

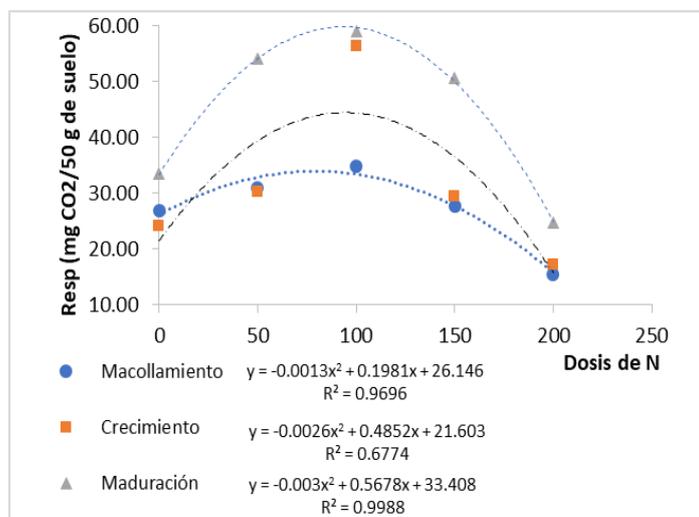


Fig. 2- Dinámica de la respiración microbiana. Etapas fenológicas de macollamiento, gran crecimiento y desarrollo y maduración del cultivo

Leyenda: Los puntos representan las medias de los valores de respiración microbiana por cada tratamiento de N aplicado.

Según las ecuaciones derivadas (figura 2), los máximos valores de respiración microbiana obtenidos son de 34,90; 56,47 y 59,13 mg CO₂, respectivamente, por cada etapa fenológicas del cultivo (macollamiento, gran crecimiento y maduración). La dosis máxima de N que coincide con estos valores es de 100 kg.ha⁻¹ de N. Este valor concuerda con las recomendaciones de N referidas

para retoño bajo las condiciones de Cuba y otros países cañeros, para obtener rendimientos agrícolas entre 90-100 ton ha⁻¹.⁽²⁸⁾

Se observaron incrementos de la respiración microbiana en la medida que aumentan las dosis de N, hasta la aplicación de 100 kg.ha⁻¹ del fertilizante nitrogenado. Dosis superiores a los 100 kg.ha⁻¹ de N para ese tipo de suelo, y las condiciones de este estudio, incidieron, negativamente en el comportamiento de la actividad metabólica de la población microbiana del suelo.

Por otro lado, los mayores valores para la respiración microbiana correspondieron en la etapa de maduración de la caña de azúcar. La fenología, y las aplicaciones de nutrientes, se encuentran dentro de los factores que afectan el proceso de exudación de las raíces. En estados tempranos de desarrollo de las plantas, los niveles de concentración de ácidos fenólicos e hidroxiaminas, son mayores, con diferencias entre plantas jóvenes y maduras. Rasgos fisiológicos, tales como, la capacidad de distribución de carbono asimilado por la raíz hacia el tallo, marcan la diferencia, en la etapa de maduración. Las raíces exudan azúcares y polisacáridos simples, aminoácidos, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos, con actividades y funciones demostradas.⁽²²⁾

El análisis de correlación (tabla 4), entre la respiración microbiana y las variables meteorológicas, mostró que existe una relación moderada, negativa y significativa con las variables tomadas al momento del muestreo, temperatura del suelo a 20 cm de profundidad, humedad relativa en la superficie del suelo con ambas variables, así como con variables que caracterizan las fases analizadas, la temperatura promedio y los grados días de estas. Este resultado demostró que el comportamiento de la respiración microbiana fue modulado no solo por las dosis de N, sino también por factores del clima, aspectos que deben ser evaluados de conjunto para determinar la eficiencia de la fertilización nitrogenada en caña de azúcar.

La temperatura y la humedad relativa, son uno de los parámetros ambientales más importantes que condicionan el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos.⁽²⁹⁾ En este estudio la temperatura disminuyó ligeramente a través de las diferentes fases fenológicas analizadas, y la humedad relativa tuvo un aumento. Estas variables están negativamente correlacionadas, e influyen en la actividad del agua, que es un factor intrínseco para el desarrollo de la microbiota.

Tabla 4- Relación entre la respiración microbiana acumulada (mg CO₂) con las temperaturas y precipitaciones en diferentes etapas fenológicas del cultivo

Variable dependiente	Variables independientes	Coef. correlación	p
Respiración microbiana	Temperatura_superficie-suelo	-0,45	0,06
	Temperatura_20 cm	-0,49	0,04
	HR_superficie-suelo	-0,49	0,04
	HR_20 cm	-0,35	0,15
	Temperatura-fase	-0,47	0,03
	Grados-dias	-0,52	0,03
	Lluvias-mes	-0,25	0,31
	Lluvia-acumulada	-0,22	0,38

Un aumento en la temperatura, reduce la humedad relativa y, por tanto, el contenido de agua del suelo. En condiciones de baja disponibilidad hídrica en el suelo, los microorganismos presentan numerosas estrategias, que incluyen la adquisición de solutos externos y la síntesis de compuestos internos, según la demanda o de forma constitutiva. Cuando el potencial hídrico alcanza valores muy negativos, la actividad microbiana cesa. Por otra parte, a mayor humedad relativa existe un incremento en el agua del suelo que reduce el estado de aireación por reducción del espacio de los poros llenos de aire disponibles para la difusión de gases, lo que favorece el desarrollo de procesos anaeróbicos.⁽³⁰⁾

La respuesta de crecimiento, supervivencia y actividad de un microorganismo al estrés hídrico, está dictada por el efecto del mismo sobre los determinantes fisiológicos. Los microorganismos se ven afectados en su actividad de acuerdo con su tolerancia específica a dicho estrés, a la continuidad y espesor de la capa de agua, resultando afectadas, principalmente, las siguientes actividades: nitrificación, solubilización, movilidad de los microorganismos, crecimiento microbiano, y actividad controladora.⁽³¹⁾

Wang *et al.* plantearon que la respiración en la comunidad microbiana está fuertemente influenciada por la disponibilidad de agua. La intensidad y duración de la respuesta de descomposición basada en la adición o pérdida de agua podría variar dependiendo de la biomasa de la comunidad microbiana y de su composición funcional y diversidad. Estos estudios se corresponden con los resultados del presente trabajo, donde se observa un patrón de incremento de la respiración a través de las etapas fisiológicas del cultivo caña de azúcar ante la variación de los factores ambientales temperatura y humedad relativa que condicionan una adición o falta de agua.⁽³²⁾

Dinámica de la respiración microbiana promedio por etapas fenológicas del cultivo, asociadas al rendimiento agrícola

La representación gráfica combinada de la respiración microbiana promedio de todas las etapas fenológicas y el rendimiento agrícola, en función de las dosis de nitrógeno, muestra que ambas curvas presentan similar respuesta con un máximo de sus valores, con una dosis de N promedio de 114,2 kg.ha⁻¹ (figura 3).

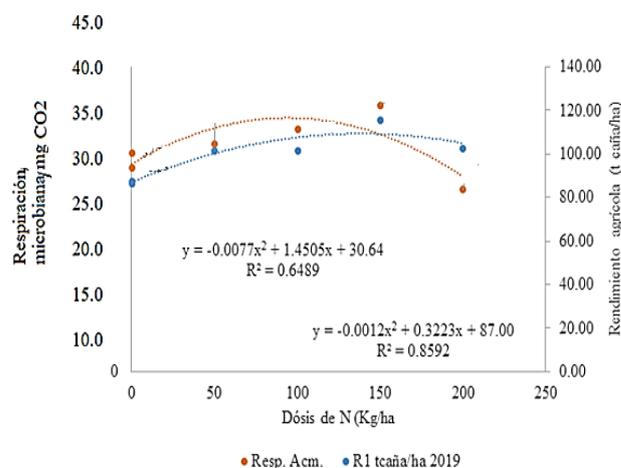


Fig. 3- Relación entre el rendimiento agrícola y respiración microbiana

La aplicación adecuada de los fertilizantes nitrogenados tiene un efecto positivo sobre los microorganismos del suelo, que a su vez favorecen el crecimiento de las plantas e incrementan el rendimiento del cultivo; la presencia de determinados tipos de bacteria produce efectos positivos en el crecimiento de las plantas. La aplicación combinada de microorganismos podría generar una potenciación o aumento de sus habilidades solubilizadoras.⁽³³⁾

Los resultados indican, que hay una asociación entre la respiración microbiana, las dosis de nitrógeno, así como, con el rendimiento agrícola. La evaluación de las interacciones caña de azúcar-microorganismos del suelo, puede ser útil para identificar un nivel óptimo de fertilización, así como nuevas fuentes de fertilizantes. Se enfatiza la necesidad de avanzar en el conocimiento sobre el uso de la comunidad microbiana del suelo en el manejo adecuado de sistemas agrícolas.

Relación de variables físico químicas y químicas del suelo con: respiración microbiana por tratamientos, rendimiento agrícola, industrial, y variables meteorológicas, mediante ACP

El análisis de componentes principales explicó, en sus dos primeras componentes, el 82,2 % de la variabilidad de los datos (tabla 5, figura 4). Se requirieron tres interacciones para lograr estos resultados, en las que se descartaron las variables meteorológicas y propiedades químicas que mostraron poca relación. Los tratamientos T1 y T2, con dosis de N igual a 0 se asociaron a mayores valores de pH en HCl, mientras que los tratamientos con dosis de N entre 50 y 150 kg. ha⁻¹, se correlacionan con tasas altas de fósforo, materia orgánica, cationes cambiabiles (Ca, Mg, Na y K), respiración microbiana y rendimientos de caña y azúcar.

Tabla 5- Correlaciones entre variables, respiración microbiana, dosis de N, y fases fenológicas del cultivo

Variable	Factor 1	Factor 2
Dosis	-0,15	-0,9
Respiración	0,61	-0,07
HR_superficie	-0,34	0,09
T_mes	-0,07	0,01
P_fósforo	-0,19	-0,89
pH_K (potasio)	-0,11	0,87
MO_materia_ orgánica	0,27	-0,7
Ca_clacio	0,98	0,02
Mg_magnesio	0,98	-0,09
Ca-Mg_relación	0,98	0,01
Na_sodio	0,98	0,01
K+_cación cambiabiles potasio	0,97	0,07
Rd_CP	0,15	-0,79
Rd_R	0,33	-0,84
PPC_Pol _caña(%)	0,69	0,62

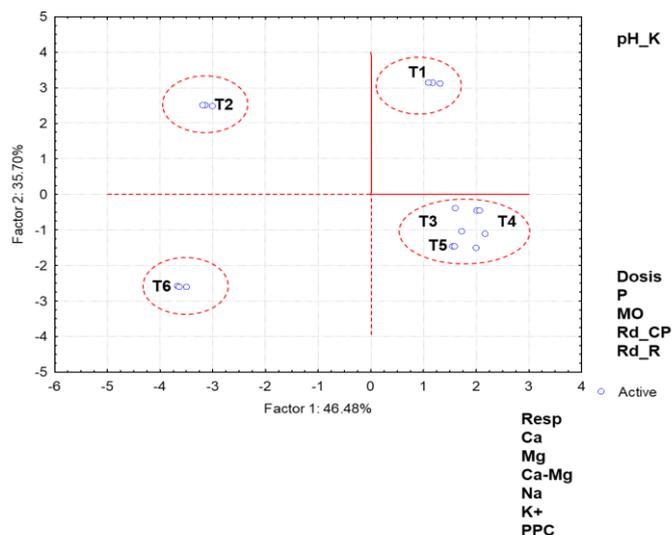


Fig. 4- Representación del ambiente en estudio en el plano de los dos primeros componentes principales

La matriz de correlación derivada del análisis anterior muestra, que existe una relación positiva entre las dosis de N y las variables: contenido de fósforo, materia orgánica y rendimientos agrícolas, que oscila entre moderada y fuerte (tabla 6); mientras que se evidencia una relación positiva entre la respiración microbiana y las variables materia orgánica y los cationes cambiabiles Mg⁺², Na y K.

Resultados similares, obtenidos por otros autores en cultivos como *Zea maíz* y *Sorghum spp*, determinaron que la aplicación de nutrientes (específicamente N) en una dosis óptima agronómica permite, no solo maximizar el rendimiento en grano, sino también, fijar más carbono; mientras que dosis excesivas (superiores al óptimo económico), resultan externalidades negativas como menor fijación de carbono y contaminación de suelos, aire y aguas.⁽³⁴⁾

Nguyen y Marschner señalaron, que la viabilidad de los microorganismos del suelo depende, en gran medida, de la calidad y disponibilidad de la materia orgánica.⁽³⁵⁾ Si los sustratos empiezan a agotarse o se interrumpe su suministro, las comunidades microbianas pueden entrar en estado latente y adoptar formas de esporas o morir, lo que reduce su biomasa, como lo confirman experimentos de laboratorio realizados por Shahbaz *et al.* Después de la muerte celular, los compuestos orgánicos contribuyen a los residuos de biomasa microbiana (necromasa), que puede constituir más de la mitad del carbono orgánico del suelo.⁽³⁶⁾

Tabla 6- Matriz de correlación entre las variables analizadas incluidas en el análisis de componentes principales

	Dosis	Resp	P	PHK	MO	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Ca ⁺² -Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Rd_CP	Rd_R
Resp	-0,09											
P	0,75	-0,08										
PHK	-0,84	0,02	-0,63									
MO	0,52	0,53	0,58	-0,45								
Ca⁺²	-0,15	0,49	-0,2	-0,11	0,17							
Mg⁺²	-0,08	0,53	-0,09	-0,23	0,31	0,98						
Ca⁺²-Mg⁺²	-0,15	0,49	-0,19	-0,12	0,19	1,00	0,98					
Na⁺	-0,18	0,53	-0,14	-0,07	0,24	0,99	0,98	0,99				
K⁺	-0,22	0,52	-0,18	0,01	0,20	0,98	0,95	0,98	0,99			
Rd_CP	0,58	-0,06	0,86	-0,70	0,40	0,17	0,28	0,18	0,21	0,15		
Rd_R	0,79	0,23	0,53	-0,94	0,64	0,31	0,43	0,32	0,27	0,2	0,58	
PPC_R	-0,61	0,22	-0,27	0,3	-0,43	0,73	0,64	0,73	0,68	0,70	-0,38	-0,18

Dado que la estructura de la comunidad microbiana se considera como un elemento crítico para la conservación de los servicios ecosistémicos del suelo al regular las tasas de descomposición de la materia orgánica, y la relación demostrada entre ambas variables en este trabajo, resulta de interés profundizar en la misma, ya que puede servir como un indicador por considerar para la recomendación de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de la caña de azúcar.

CONCLUSIONES

La microbiota asociada a la rizosfera de caña de azúcar, determinada a través de la respiración microbiana, incrementa su actividad, valores de respiración microbiana, en la medida que aumentaron las dosis del fertilizante hasta los 100 kg.ha⁻¹, donde alcanza su máximo valor, independientemente de la etapa fenológica del cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SEBASTIAN DOMINGO; JUAN J.; SÁNCHEZ SÁNCHEZ C. “De la flora intestinal a la microbioma”. *Rev. esp. enferm. dig.*, 2018. **101**(1): 51-56. <https://dx.doi.org/10.17235/reed.2017.4947/2017>
- RASHID, M. I. *et al.* “Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils”. *Microbiol. Res.*, 2016. 183: 26-41. <https://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.007>
- BOLAT, İ. “Microbial biomass, basal respiration, and microbial indices of soil in diverse croplands in a region of northwestern Turkey (Bartın)”. *Environ Monit Assess.*, 2019, 191(11), 695. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7817-1>

- FENG, Y *et al.* “Responses of Soil Bacterial Diversity to Fertilization are Driven by Local Environmental Context Across China”. *Engineering*. 2022, 12: 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.09.012>
- OLIVARES, B. O. *et al.* “Relationship Between Soil Properties and Banana Productivity in the Two Main Cultivation Areas in Venezuela”. *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 2020, 20: 2512-2524. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00317-8>
- MORALES-MORALES, E. J. *et al.* “Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales”. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2019, 10(8): 1875-1886. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.1732>
- DÍAZ R., A. M. “The current and future role of microbial culture collections in food security worldwide. *front. Sustain*”. *Food Syst*, 2021. 4: p. 614739. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.614739>
- LI, C.-X.; MA, S.-C.; SHAO, Y.; MA, S.-T.; ZHANG, L.-L. “Effects of long-term organic fertilization on soil microbiologic characteristics, yield and sustainable production of winter wheat”. *J. Integr. Agric.*, 2018. 17: p. 210-219. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61740-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61740-4)
- PUZNIAK, O.; HRYNCHYSHYN, N.; DATSKO, T.; ANDRUSZCZAK, S.; HULKO, B. “Consequences of the Long-Term Fertilization System Use on Physical and Microbiological Soil Status in the Western Polissia of Ukraine”. *Agriculture* 2022, 12, 1955. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111955>
- PEREIRA, P.; BOGUNOVIC, I.; MUNOZ-ROJAS, M.; BREVIK, E. C. “Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management”. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 2018. 5: p. 7-13.

https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2018COE.SH...5....7P/doi:10.1016/j.coesh.2017.12.003

11. PABLOS, P. “Actualización de criterios diagnósticos para la fertilización nitrogenada de la caña de azúcar en Cuba”. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Ministerio de Educación Superior, Universidad Agraria de La Habana, 2011, 101 p.

12. HERNÁNDEZ, A.; MARISOL MORALES Y; ASCANIO, O. *Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba*. Ed. Instituto de Suelos, Ministerio de la Agricultura, 1999, 64 pp. ISBN: 978-959-246-022-5.

https://www.google.com.cu/books/edition/Nueva_ver_si%C3%B3n_de_clasificaci%C3%B3n_gen%C3%A9tica/qVTwZwEACAAJ?hl=es

13. JORIS, H. A. W.; VITTI, A. C.; FERRAZ ALMEIDA, R. *et al.* “Long-term N fertilization reduces uptake of N from fertilizer and increases the uptake of N from soil”. *Sci. Rep.* 2020, 10, 18834. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75971-0>

14. MURILLO, J. *et al.* “Efecto de la aplicación de prácticas sostenibles en las características físicas, químicas y microbiológicas de suelos degradados”. *Pastos y Forrajes*. 2014, 37(3), 270-278. <https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path%5B%5D=1800>

15. LI, Y.; WANG, J.; M., SHAO, A. “Assessment of earthworms as an indicator of soil degradation: A case-study on loess soils”. *Land Degradation and Development*, 2021, 32: p. 2606-2617. <https://doi.org/10.1002/ldr.3928>

16. ANDERSON, J.P.E.; DOMSCH, K. H. “A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils”. *Soil Biol. Biochem.* 1978, 10: 215-221. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)

17. HANEY, R. L.; BRINTON, W.F. ; EVANS, E. “Soil CO₂ respiration: Comparison of chemical titration, CO₂ IRGA analysis and the Solvita gel system”. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2008, 23(2): 171-176. <https://doi.org/10.1017/S174217050800224X>

18. INICA. *Normas Metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar*. Editorial INICA. La Habana, Cuba. Tomo 1. 1990. 100 pp.

19. RODRÍGUEZ MAMBUCA, R. J.; RODRÍGUEZ LÓPEZ, J.; MESA ORAMAS, J.; FERNÁNDEZ ÁLVAREZ, F.; SÁNCHEZ HERRERA, A. “Comportamiento de algunos parámetros del azúcar crudo en el quinquenio 2006-2010. Parte 1”. *ICIDCA*.

Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar [en línea];. 2014, 48(1), 39-43[fecha de consulta 5 de septiembre de 2024];. ISSN: 0138-6204. Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223131337006>

20. BRANCOURT-HULMEL, M; LECOMTE, C. “Effect of environmental variates on genotype environment interaction of winter wheat: A comparison of biadditive factorial regression to AMMI”. *Crop Sci.* 2003, 43:608-617. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.6080>

21. StatSoft, Inc. 2007. STATISTICA (Data Analysis Software System), version 8.0. www.statsoft.com.

22. OLIVEROS-BASTIDAS, A. J.; MACÍAS, F. A.; CARRERA-FERNÁNDEZ, C.; MARÍN, D.; MOLINILLA, J. M. “Exudados de la raíz y su relevancia actual en las interacciones alelopáticas”. *Quím. Nova.* 2009, 32(1). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100035>

23. DE SOUZA, R. *et al.* “Unlocking the bacterial and fungal communities assemblages of sugarcane microbiome”. *Sci Rep.* 2016, 6(1):28774. <https://doi.org/10.1038/srep28774>

24. YUAN, Z. *et al.* “Sugarcane Rhizosphere Bacteria Community Migration Correlates with Growth Stages and Soil Nutrient”. *International journal of molecular sciences.* 2022, 23(18): 10303. <https://doi.org/10.3390/ijms231810303>

25. SMITH, M. E.; FACELLI, J. M.; CAVAGNARO, T. R. “Interactions between soil properties, soil microbes and plants in remnant-grassland and old-field areas: a reciprocal transplant approach”. *Plant and Soil*, 2018, 433(1-2): 127-145. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3823-2>

26. XIAO, E. “Variation in rhizosphere microbiota correlates with edaphic factor in an abandoned antimony tailing dump”. *Environmental Pollution*, 2019, 253: p. 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.097>

27. SCHULTZ, N. *et al.* “Yield of sugarcane varieties and their sugar quality grown in different soil types and inoculated with a diazotrophic bacteria consortium”. *Plant Prod. Sci.* 2017, 20: 1-9. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1374869>

28. DE LEÓN, M.; PÉREZ, H.; VILLEGA, R. “Nutrición y Fertilización”. En: PÉREZ H., SANTANA I., RODRÍGUEZ I (Eds). *Manejo Sostenible de Tierras en la Producción de Caña de Azúcar*. Grupo azucarero AZCUBA. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. Editorial INICA. 2013, 71-77. ISBN: 978-959-300-051-2.

29. CERVANTES MARTÍNEZ, J.; ORIHUELA EQUIHUA, R.; RUTIAGA QUIÑONES, J. G. “Acerca del desarrollo y control de microorganismos en la fabricación de papel”. *Conciencia Tecnológica*, 2017, 54, 54-58. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94454631001>
30. RAMOS-VÁSQUEZ, E.; ZÚÑIGA-DÁVILA, D. “Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio”. *Ecología Aplicada*. 2008, 7(1 2): 123-130. <https://doi.org/10.21704/rea.v7i1-2.367>
31. HARRIS, R. F. “Effect of Water Potential on Microbial Growth and Activity”. In: D. M. KRAL *et al.* Eds. *Water Potential Relations in Soil Microbiology*. Vol. 9, Soil Science Society of America-Madison.1981. p. 23-95. <https://doi.org/10.2136/sssaspepub9.c2>
32. WANG, X. *et al.* “Soil respiration under climate warming: Differential response of heterotrophic and autotrophic respiration”. *Glob. Chang. Biol.* 2014, 20: 3229-3237. <https://doi.org/10.1111/gcb.1262033>
33. PATIÑO TORRES, C. O.; SANCLEMENTE REYES, O. E. “Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible”. *Entramado* [;en línea];. 2014, 10(2), 288-297[;fecha de Consulta 5 de Septiembre de 2024];. ISSN: 1900-3803. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=265433711018>
34. POFFENBARGER, H. J. *et al.*, “Maximum soil organic carbon storage in Midwest U.S. cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized”. *Plos one*. 2017, 12(3): e0172293. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172293>
35. NGUYEN, T. T.; MARSCHNER, P. “Soil respiration, microbial biomass and nutrient availability in soil after repeated addition of low and high C/N plant residues”. *Biol. Fertil. Soils*. 2016, 52: 165-176. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1063-7>
36. SHAHBAZ, M. *et al.* “Microbial decomposition of soil organic matter is mediated by quality and quantity of crop residues: mechanisms and thresholds”. *Biol. Fertil. Soils*. 2017, 53: 287-301. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1174-9>

DECLARACIÓN CONFLICTO DE INTERESES

Los autores expresan que no hay conflictos de intereses en el manuscrito presentado.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Pablo Pablos Reyes: adquisición de fondos, supervisión y administración del proyecto, metodología y validación.

Mónica Tamayo Isaac: proceso de investigación, curaduría, validación de los datos y redacción del borrador original.

Yaquelín Puchades Izaguirre: proceso de investigación, la curaduría, validación de los datos y redacción del borrador original.

Dolores del Rosario Piñón Gómez: conceptualización, adquisición de recursos y supervisión; y análisis formal.

Rosa María Pérez: revisión, edición y visualización.