

Dinámica de la biomasa microbiana en un suelo cultivado con *Zea mays* tratado con lodos papeleros y aceite residual

Microbial biomass dynamics in a *Zea mays*-cultivated soil treated with paper mill sludge and waste cooking oil

Dinâmica da biomassa microbiana em um solo cultivado com *Zea mays* tratado com lodo de papel e óleo residual

Parra Acosta Gabriela Adelycia ¹, Armado Matute Arnaldo José ^{1*}

¹ Facultad de Ciencias y Tecnología. Universidad de Carabobo, Naguanagua 2005. Venezuela. ROR: <https://ror.org/05sj7yp62>

✉ gabyadely@gmail.com

| ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7673-4906>

✉ aarmado@uc.edu.ve

| ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4670-0339>

E-mail de correspondencia: aarmado@uc.edu.ve

Revista Saastal

Vol. 2(1) enero - junio 2026

<https://doi.org/10.63804/saastal.v2i1.e3>

Como citar este artículo

Parras G., & Armado, A. (2026). *Dinámica de la biomasa microbiana en un suelo cultivado con Zea mays tratado con lodos papeleros y aceite residual*. Saastal, 2(1), e3.

© 2026 Saastal. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite debidamente al autor y la fuente original.

Recibido: 11 de diciembre de 2025

Revisado: 12 de enero de 2026

Aceptado: 25 de enero de 2026

Publicado: 05 de marzo de 2026

Resumen

La degradación del suelo agrícola reduce los servicios ecosistémicos y el rendimiento de cultivos estratégicos como *Zea mays*. La incorporación de enmiendas orgánicas mixtas optimiza las propiedades edáficas, sin embargo, la variabilidad metodológica en la cuantificación de la biomasa microbiana del suelo (BMS) limita el monitoreo preciso de su recuperación. En un diseño experimental en invernadero, se evaluó un suelo tratado con una enmienda mixta de lodo paplero y aceite comestible usado (relación 3:1) en dosis de 0, 5 y 25 Mg/ha. Durante 117 días se determinaron parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y humedad) y microbiológicos (respiración basal y carbono de la biomasa microbiana, MBC). El MBC se cuantificó mediante dos metodologías: fumigación-incubación (FI) y respiración inducida por sustrato (SIR). Los datos se analizaron mediante estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis, correlación de Spearman y análisis de componentes principales (PCA). La enmienda incrementó significativamente el pH de ligeramente ácido (6,24) a neutro ($p < 0,05$) y elevó la materia orgánica edáfica. La actividad y biomasa microbiana mostraron incrementos proporcionales a la dosis de enmienda y al tiempo de incubación, alcanzando los valores máximos a los 117 días con la dosis de 25 Mg/ha. Se determinó una correlación positiva fuerte entre FI y SIR ($r_s > 0,80$; $p < 0,05$). El método FI exhibió mayor sensibilidad analítica, registrando un valor máximo de 2239,84 mg C-Biomasa/kg y un coeficiente de variación de 1,23 %. El PCA segregó los sistemas enmendados en función de la estimulación biológica inducida. La enmienda LP-ACU induce efectos positivos sostenidos sobre la calidad biológica y química del suelo. Ambas metodologías analíticas son viables y correlativas para el monitoreo biológico, validando la rapidez de SIR y la alta precisión y sensibilidad de FI para la evaluación de suelos agrícolas bajo manejo orgánico.

Palabras clave: calidad del suelo; carbono de la biomasa microbiana; enmiendas orgánicas; lodos de papelería; respiración inducida por el sustrato; suelo agrícola.

Abstract

Agricultural soil degradation reduces ecosystem services and the productivity of strategic crops such as *Zea mays*. The incorporation of mixed organic amendments improves soil properties; however, methodological variability in the quantification of soil microbial biomass (SMB) limits the accurate monitoring of soil recovery. In a greenhouse experimental design, soil treated with a mixed amendment composed of paper mill sludge and used cooking oil (3:1 ratio) was evaluated at application rates of 0, 5, and 25 Mg ha⁻¹. Over a period of 117 days, physicochemical parameters (pH, electrical conductivity, organic matter, and moisture) and microbiological parameters (basal respiration and microbial biomass carbon, MBC) were determined. MBC was quantified using two methodologies: fumigation-incubation (FI) and substrate-induced respiration (SIR). Data were analyzed using the nonparametric Kruskal–Wallis test, Spearman correlation, and principal component analysis (PCA). The amendment significantly increased soil pH from slightly acidic (6.24) to neutral conditions ($p < 0.05$) and enhanced soil organic matter content. Microbial activity and biomass increased proportionally with amendment dose and incubation time, reaching maximum values at 117 days with the 25 Mg ha⁻¹ treatment. A strong positive correlation was observed between FI and SIR methods ($r_s > 0.80$; $p < 0.05$). The FI method exhibited greater analytical sensitivity, recording a maximum value of 2239.84 mg biomass C kg⁻¹ and a coefficient of variation of 1.23%. PCA clearly separated amended systems according to the induced biological stimulation. The paper sludge–used cooking oil amendment (PS-UCO) induced sustained positive effects on the biological and chemical quality of the soil. Both analytical methodologies proved to be viable and strongly correlated tools for biological monitoring, confirming the rapidity of SIR and the high precision and sensitivity of FI for the assessment of agricultural soils under organic management.

Keywords: soil quality; microbial biomass carbon; organic amendments; paper mill sludge; substrate-induced respiration; agricultural soil.

Resumo

A degradação do solo agrícola reduz os serviços ecossistêmicos e o rendimento de culturas estratégicas, como o *Zea mays*. A incorporação de corretivos orgânicos mistos otimiza as propriedades edafológicas; no entanto, a variabilidade metodológica na quantificação da biomassa microbiana do solo (BMS) limita o monitoramento preciso de sua recuperação. Em um projeto experimental em estufa, foi avaliado um solo tratado com um corretivo misto de lodo de papelaria e óleo comestível usado (proporção 3:1) em doses de 0, 5 e 25 Mg/ha. Durante 117 dias, foram determinados parâmetros físico-químicos (pH, condutividade elétrica, matéria orgânica e umidade) e microbiológicos (respiração basal e carbono da biomassa microbiana, MBC). O MBC foi quantificado por meio de duas metodologias: fumigação-incubação (FI) e respiração induzida por substrato (SIR). Os dados foram analisados por meio da estatística não paramétrica de Kruskal-Wallis, correlação de Spearman e análise de componentes principais (PCA). A correção aumentou significativamente o pH de levemente ácido (6,24) para neutro ($p < 0,05$) e elevou a matéria orgânica do solo. A atividade e a biomassa microbianas apresentaram aumentos proporcionais à dose de aditivo e ao tempo de incubação, atingindo valores máximos aos 117 dias com a dose de 25 Mg/ha. Foi determinada uma forte correlação positiva entre o FI e o SIR ($r_s > 0,80$; $p < 0,05$). O método FI apresentou maior sensibilidade analítica, registrando um valor máximo de 2239,84 mg C-Biomassa/kg e um coeficiente de variação de 1,23 %. A PCA separou os sistemas corrigidos em função da estimulação biológica induzida. A correção LP-ACU induz efeitos positivos sustentados sobre a qualidade biológica e química do solo. Ambas as metodologias analíticas são viáveis e correlativas para o monitoramento biológico, validando a rapidez do SIR e a alta precisão e sensibilidade do FI para a avaliação de solos agrícolas sob manejo orgânico.

Palavras-chave: qualidade do solo; carbono da biomassa microbiana; corretivos orgânicos; lodo de fábrica de papel; respiração induzida pelo substrato; solo agrícola.

Introducción

La degradación de los suelos agrícolas debida a la intensificación de los sistemas de cultivo y al uso excesivo de insumos sintéticos representa una de las mayores amenazas para la seguridad alimentaria global y la sostenibilidad de los agroecosistemas. En cultivos de alta demanda nutricional y extracción hídrica como el maíz (*Zea mays*), la pérdida continua de materia orgánica edáfica altera las propiedades físicas y químicas del suelo, lo que provoca su compactación, disminución de la capacidad de retención de agua con la consecuente caída en el rendimiento biológico de las plantaciones [1]. Ante este escenario, la incorporación de enmiendas orgánicas se ha empleado como una estrategia ecológica y económicamente viable para restaurar la fertilidad del suelo. Esta estrategia promueve el secuestro de carbono y la mitigación del impacto ambiental negativo derivado de las prácticas agrícolas convencionales.

Paralelamente, la generación exponencial de residuos agroindustriales plantea un desafío crítico en términos de gestión ambiental y disposición final. Entre estos pasivos, los lodos papeleros (LP), caracterizados por un alto contenido de materiales celulósicos y carbonatos, y por su parte, los aceites comestibles usados (ACU), reconocidos por su alta densidad energética y contenido de cadenas hidrocarbonadas, se plantean como alternativas prometedoras para el codiseño de mejoradores edáficos [2], [3]. La sinergia entre un sustrato estructurante como el LP y una fuente de carbono hidrofóbica pero altamente calórica como el ACU puede potenciar la formación de agregados estables en el suelo y proporcionar un suministro diversificado de nutrientes a largo plazo, transformando dos contaminantes industriales en recursos de valor agronómico dentro de un modelo de economía circular [4].

No obstante, la evaluación de la recuperación del suelo no puede limitarse exclusivamente al monitoreo de parámetros fisicoquímicos tradicionales, dado que estos experimentan variaciones medibles solo a mediano o largo plazo. En su lugar, los indicadores microbiológicos y bioquímicos, particularmente la actividad respiratoria basal y el carbono de la biomasa microbiana (BMS), ofrecen una respuesta altamente sensible y temprana ante los cambios ambientales o antropogénicos inducidos en el agroecosistema [5]. La BMS, que representa la fracción viva y metabólicamente activa de la materia orgánica, actúa como una fuerza motriz importante en el ciclo de nutrientes, descomposición de xenobióticos y la estabilidad estructural del suelo.

A pesar de que el codiseño de enmiendas basadas en lodos papeleros (LP) y aceites comestibles usados (ACU) ha demostrado viabilidad teórica para restaurar el carbono orgánico, existe una brecha de conocimiento crítica respecto a la consistencia metodológica

para monitorear la respuesta microbiana a largo plazo bajo cultivos intensivos [6]. Los métodos analíticos indirectos para determinar el carbono de la biomasa microbiana, como la fumigación-incubación (FI) y la respiración inducida por sustrato (RIS), se basan en supuestos fisiológicos diferentes cuyas divergencias cinéticas y de sensibilidad no han sido contrastadas rigurosamente en sistemas edáficos enmendados con residuos hidrofóbicos y celulósicos mixtos [7].

Para solventar esta limitación, esta investigación plantea como objetivos principales: a) caracterizar la evolución fisicoquímica transitoria del suelo bajo cultivo de *Zea mays* tratado con diferentes dosis de la mezcla LP-ACU, b) evaluar la variación temporal del carbono de la biomasa microbiana aplicando de forma paralela los métodos FI y RIS, y c) contrastar estadísticamente la sensibilidad y correlación de ambas metodologías analíticas. Este trabajo aporta una contribución original doble: proporciona un modelo de valorización agronómica para dos pasivos industriales de difícil gestión y establece un marco de referencia metodológico para la estandarización de indicadores biológicos en la evaluación de la calidad y sustentabilidad edáfica.

Metodología

Diseño experimental y área de estudio

La investigación se llevó a cabo bajo condiciones controladas de invernadero en la casa de cultivo de Industrias Diana C.A., ubicada en la Zona Industrial Sur II, Valencia, Estado Carabobo, Venezuela. El diseño experimental consistió en un arreglo de bloques completamente aleatorizados con tres tratamientos por duplicado, totalizando seis unidades experimentales (parcelas de 12,5 m² cada una). Los tratamientos evaluados se definieron en función de la dosis de aplicación de una enmienda orgánica mixta:

- **Control (T0):** suelo agrícola sin adición de enmienda orgánica.
- **Dosis Baja (T1):** suelo tratado con una dosis equivalente a 5 Mg/ha (0,2 % p/p) de la enmienda mixta.
- **Dosis Alta (T2):** suelo tratado con una dosis equivalente a 25 Mg/ha (1,0 % p/p) de la enmienda mixta.

La enmienda orgánica mixta se formuló mediante la co-disposición de lodo paplero (LP) y aceite comestible usado (ACU) en una relación de mezcla de 3:1 (p/p), sometiéndose a un proceso de maduración estática previa de 60 días antes de su incorporación al suelo. Inmediatamente después de la aplicación de los tratamientos, se procedió a la siembra manual de maíz (*Zea mays*). El monitoreo temporal del sistema edáfico se estructuró en tres periodos

de muestreo estratégico: 50, 87 y 117 días post-aplicación, correspondientes a las fases de desarrollo vegetativo, floración y senescencia del cultivo, respectivamente.

El terreno fue dividido en 6 parcelas (P1-P6) de 12,5 m² (Figura 1) que fueron objeto de estudio se aplicó una mezcla de enmiendas orgánicas.

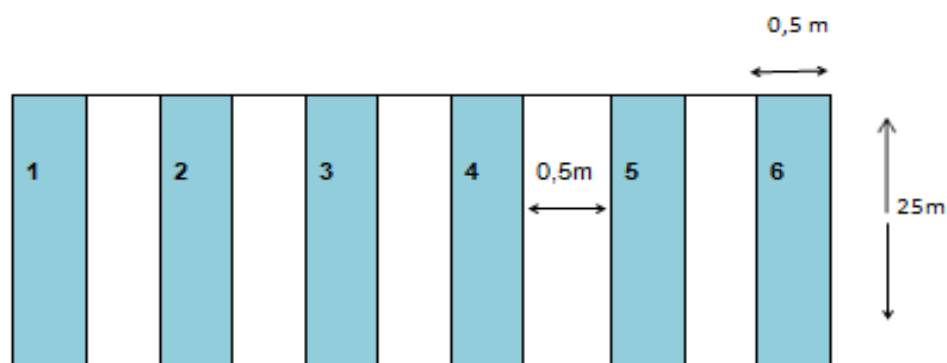


Figura 1. Distribución y dimensiones del terreno a utilizar para el sistema suelo- enmienda orgánica, bajo cultivo de maíz.

De acuerdo a las divisiones de las parcelas, la aplicación de las enmiendas se realizó de la siguiente manera, las parcelas 1 y 2 fueron tomadas como controles, las parcelas 3 y 4 se le aplicó 5 Mg/ha de la mezcla de enmiendas orgánicas, en el caso de las parcelas 5 y 6 la mezcla se aplicó en una cantidad de 25 Mg/ha.

En cada parcela y tiempo de muestreo, se recolectaron muestras de suelo compuestas mediante un muestreo sistemático en zigzag a una profundidad de 20-30 cm. Las muestras se tamizaron inmediatamente a través de una malla de 2 mm; una fracción se almacenó a 4 °C para los ensayos microbiológicos y la otra se secó al aire para las determinaciones fisicoquímicas.

Caracterización fisicoquímica del suelo

Los parámetros fisicoquímicos basales y su evolución transitoria se determinaron aplicando protocolos estandarizados:

- **pH y Conductividad Eléctrica (CE).** Medidos en una suspensión suelo:agua destilada desionizada en relación 1:2 (p/v) tras un periodo de agitación de 30 min y reposo de 15 min, utilizando un potenciómetro (métrica digital, precisión $\pm 0,01$) y un conductímetro digital previamente calibrados con soluciones reguladoras certificadas.
- **Materia Orgánica (MO).** Determinada indirectamente mediante el método de pérdida por calcinación (LOI). El suelo seco se sometió a ignición en una mufla a

430 °C durante 24 h, calculando el porcentaje de MO mediante el diferencial de masa según la Ecuación 1:

$$MO = \frac{W_{105} - W_{430}}{W_{105}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde W_{105} representa la masa del suelo seco a 105 °C y W_{430} la masa remanente post-calcinación.

- **Humedad Gravimétrica (θ_g).** Evaluada por desecación térmica en estufa convencional a 105 °C hasta peso constante (≈ 24 h), definida matemáticamente en la Ecuación 2 como:

$$\theta_g = \frac{M_{húmeda} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Cuantificación del carbono de la biomasa microbiana (MBC)

Para la evaluación de la biomasa microbiana del suelo se ejecutaron en paralelo dos metodologías analíticas fundamentadas en flujos de carbono gaseoso:

Método de fumigación-incubación (FI)

Basado en el protocolo clásico de Jenkinson y Powlson. Muestras duplicadas de suelo equivalente a 30 g de peso seco se ajustaron al 50-60 % de su capacidad de retención de agua [8], [9]. El primer set de muestras se sometió a fumigación con cloroformo ($CHCl_3$) libre de etanol en una cámara de desecación al vacío en la oscuridad a 25 °C durante 7 días para inducir la lisis celular de la microbiota. Tras eliminar los residuos de $CHCl_3$ mediante evacuaciones repetidas de vacío, las muestras fumigadas se inocularon con 1 g de suelo fresco del mismo tratamiento y se incubaron en frascos herméticos a 25 °C durante 10 días. En paralelo, un set idéntico de muestras no fumigadas (control) se incubó bajo las mismas condiciones físicas.

El dióxido de carbono (CO_2) desprendido durante el periodo de incubación metabólica fue capturado en una solución trampa de hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 M. El CO_2 atrapado en forma de carbonato se precipitó mediante la adición de cloruro de bario ($BaCl_2$) 0,5 M, y el exceso de álcali libre se valoró por retrovaloración potenciométrica con ácido clorhídrico (HCl) 0,1 M, empleando fenolftaleína como indicador de viraje. El cálculo del MBC (mgC-biomasa kg^{-1} suelo seco) se ejecutó mediante la Ecuación 3:

$$MBC_{FI} = \frac{B_f - B_{nf}}{K_c} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde B_f es el CO₂-C mineralizado por el suelo fumigado, B_{nf} es el CO₂-C liberado por el suelo control no fumigado, y K_c es el factor de eficiencia de conversión biológica estandarizado en 0,45, que representa la fracción de la biomasa microbiana remanente que se mineraliza a CO₂ bajo las condiciones dadas.

Método de respiración inducida por sustrato (SIR)

Ejecutado siguiendo la aproximación analítica descrita por Anderson y Domsch. Submuestras de suelo fresco (30 g equivalentes a peso seco) se enmendaron homogéneamente con una solución saturada de D-glucosa anhidra a una dosis óptima predeterminada de 120 mg de glucosa por muestra para garantizar la máxima tasa de respuesta respiratoria (saturación de los transportadores celulares) [10]. Los sistemas se pre-incubaron a 25 °C durante 2 h para estabilizar las perturbaciones mecánicas iniciales.

Posteriormente, los frascos se sellaron herméticamente y el flujo cinético de desprendimiento de CO₂ basal activo se capturó en una solución de NaOH 0,1 M durante un periodo estricto de 4 h a 25 °C. La cuantificación química del carbonato generado se realizó mediante el mismo protocolo de precipitación con BaCl₂ y titulación ácido-base con HCl 0,1 M descrito para el método FI. El cálculo de la biomasa funcional se derivó directamente de la tasa máxima de respiración inicial de acuerdo con la relación matemática descrita por Anderson y Domsch [11].

Tratamiento estadístico de los datos

Para garantizar el rigor metodológico y la validez analítica, todas las determinaciones se realizaron por triplicado. Inicialmente, se evaluaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los datos experimentales mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Debido a la naturaleza no paramétrica inherente confirmada y a la variabilidad intrínseca de los recuentos biológicos, el efecto de las dosis de enmienda orgánica y del factor tiempo sobre los parámetros medidos se analizó mediante la prueba multi-comparativa de Kruskal-Wallis, fijando un nivel de significancia crítica de $\alpha = 0,05$.

Las diferencias específicas entre las medianas de los tratamientos se resolvieron mediante contrastes *post-hoc* por pares. El grado de asociación, dirección y convergencia lineal entre los perfiles temporales de la BMS estimados por las metodologías FI y SIR, así como con las variables fisicoquímicas, se estableció aplicando matrices de correlación por rangos de Spearman (r_s). Finalmente, se ejecutó un Análisis de Componentes Principales (PCA) empleando una matriz de correlación estandarizada con el software Past3, con el objetivo de discriminar las trayectorias multivariantes de los sistemas edáficos en función de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas integradas.

Resultados y discusión

Evolución dinámica de las propiedades fisicoquímicas del suelo

La caracterización basal del suelo receptor evidenció un estado de degradación química y física crítica para el desarrollo agrícola continuo, se registró un pH ligeramente ácido (6,24-6,33), conductividad eléctrica no salina (1,348-1,375 dS/m) y un contenido deficitario de materia orgánica ($MO < 0,85 \%$).

La incorporación de la enmienda mixta de lodo papelerero y aceite comestible usado (LP-ACU) indujo modificaciones transitorias significativas en la matriz edáfica en función de la dosis aplicada y el tiempo de incubación (Prueba de Kruskal-Wallis, $p < 0,05$).

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas iniciales y evolución temporal del suelo agrícola enriquecido.

Parámetro	Resultado	Coefficiente de Variación (%)
Conductividad (dS/m)	1,348 -1,375	1,030792
Potencial de hidrógeno, pH	6,24 - 6,33	0,717272
Retención de humedad (%)	50,00 - 55,33	5,137406
Coefficiente higroscópico	0,55 - 0,79	20,89174
Materia orgánica (%)	0,44- 0,84	35,13465

El pH del suelo experimentó una alcalinización gradual y controlada en los tratamientos enmendados (T1 y T2), desplazándose desde la acidez original hacia valores de neutralidad estables (6,95-7,15) a los 117 días post-aplicación. Este comportamiento se atribuye al efecto tampón y neutralizante de los carbonatos residuales constituyentes del lodo papelerero, los cuales actúan de forma análoga a una enmienda caliza convencional, incrementando la disponibilidad potencial de macronutrientes esenciales en la rizosfera de *Zea mays* [12], [13].

Por su parte, el contenido de materia orgánica residual se elevó de manera proporcional a la dosis, actuando el tratamiento de 25 Mg/ha (T2) como un sumidero eficiente de carbono estructural. Esta acumulación de carbono orgánico incrementó la superficie específica de adsorción hidrofílica, induciendo un aumento estadísticamente significativo en la humedad gravimétrica del suelo al final del ciclo experimental, contrarrestando la tendencia a la desecación observada en el sistema control (T0).

Cinética de los indicadores microbiológicos y sensibilidad de los métodos analíticos

La actividad metabólica global, evaluada mediante la tasa de respiración basal, y las estimaciones del carbono de la biomasa microbiana (MBC) a través de los métodos de Fumigación-Incubación (FI) y Respiración Inducida por Sustrato (SIR). Los resultados se muestran en la Figura 2, se encontró incrementos notables y altamente dependientes de la dosis de enmienda provista ($p < 0,001$).

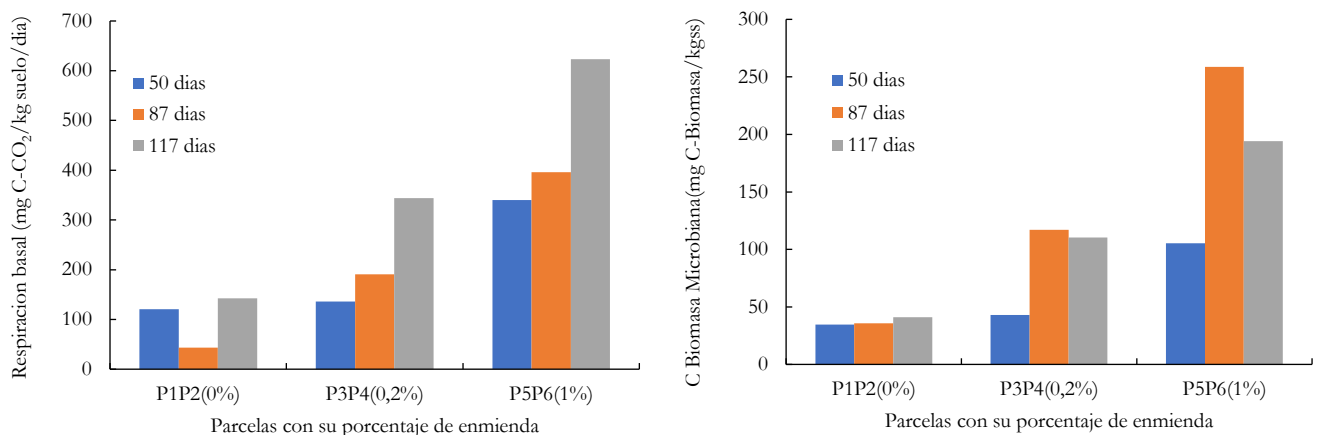


Figura 1. Dinámica temporal de los indicadores de la calidad microbiológica del suelo (respiración, MBC-FI y MBC-SIR)

Durante los primeros 50 días, los flujos respiratorios y los recuentos de biomasa aumentaron significativamente en los tratamientos T1 y T2 en comparación con el control. Esta fase inicial de estimulación biológica responde a la disponibilidad inmediata de las fracciones de carbono lábil y ácidos grasos de cadena corta presentes en el aceite residual, los cuales actúan como sustratos energéticos de fácil asimilación para las comunidades microbianas autóctonas latentes [14], [15].

Entre los días 87 y 117, coincidiendo con las fases de floración y senescencia del cultivo de maíz, se registró la máxima expresión cuantitativa de la biomasa microbiana. Bajo la dosis alta de 25 Mg/ha (T2), el método FI detectó un pico máximo absoluto de biomasa microbiana de 2239,84 mg C-Biomasa/kg a los 117 días. Este incremento sostenido a largo plazo demuestra que, tras la degradación de los lípidos de fácil acceso, la microbiota edáfica experimentó una sucesión ecológica orientada hacia poblaciones con capacidad enzimática celulolítica (principalmente hongos y actinobacterias), capaces de metabolizar eficientemente los polímeros de celulosa estructural aportados por la fracción de lodo paplero de la enmienda [16].

Al evaluar ambos métodos analíticos indirectos, se determinó una divergencia sistemática en las magnitudes absolutas de carbono computadas: los valores de biomasa derivados de FI superaron de manera consistente a los estimados mediante SIR en todos los muestreos. Esta discrepancia es intrínseca a los fundamentos fisicoquímicos y biológicos de cada protocolo. El método de fumigación-incubación (FI) mide el flujo acumulado de carbono liberado tras la lisis celular masiva provocada por el vapor de $CHCl_3$, lo que abarca tanto a la población microbiana metabólicamente activa como a los microorganismos en estado de dormancia o quiescencia que preservan su integridad celular.

En contraste, el método de respiración inducida por sustrato (SIR) cuantifica la respuesta fisiológica respiratoria instantánea desencadenada tras un pulso de saturación con glucosa en un periodo acortado de 4 horas; por lo tanto, evalúa de forma selectiva la fracción zymógena o biológicamente activa de la microbiota capaz de responder inmediatamente al estímulo del sustrato lábil.

A pesar de estas diferencias cuantitativas, el análisis psicrométrico y matemático reveló una robusta consistencia analítica entre ambos enfoques.

Table 2. Matriz de correlación de rangos no paramétrica de Spearman (r_s) entre parámetros edáficos.

	CE	pH	RH	H	MO	RB	CBM (RIS)	CBM (FI)
CE		0,025105	-0,066667	-0,53333	0,1	-0,33333	-0,48333	-0,31667
pH	0,025105		0,56067	0,5021	0,066946	0,56067	0,51046	0,71967
RH	-0,066667	0,56067		0,71667	-0,11667	0,78333	0,5	0,76667
H	-0,53333	0,5021	0,71667		-0,45	0,65	0,6	0,81667
MO	0,1	0,066946	-0,11667	-0,45		0,31667	0,33333	0,033333
RB	-0,33333	0,56067	0,78333	0,65	0,31667		0,9	0,9
CBM (RIS)	-0,48333	0,51046	0,5	0,6	0,33333	0,9		0,88333
CBM (FI)	-0,31667	0,71967	0,76667	0,81667	0,033333	0,9	0,88333	

La matriz de correlación por rangos de Spearman confirmó una asociación lineal positiva y altamente significativa entre el método FI y el método SIR ($r_s > 0,80$; $p < 0,01$). Este resultado valida la complementariedad de ambas técnicas en estudios de monitoreo ambiental.

No obstante, en términos de sensibilidad y reproducibilidad analítica, el método FI demostró un rendimiento superior frente a SIR en sistemas tratados con residuos hidrofóbicos complejos. FI exhibió coeficientes de variación (CV) significativamente más bajos y estables

(alcanzando un mínimo de 1,23 % en los tratamientos de máxima dosis), debido a que el periodo de incubación prolongado de 10 días amortigua las perturbaciones termodinámicas puntuales y la heterogeneidad física micro-espacial inducida por las gotas residuales de aceite en el suelo, permitiendo una cinética de mineralización más homogénea y reproducible que la medida en el protocolo de lectura rápida característico de SIR.

Conclusiones

La enmienda orgánica mixta lodo papelerero-aceite comestible usado (LP-ACU) restauró eficazmente la calidad química del suelo franco-ácido degradado, induciendo una neutralización progresiva y estable del pH hacia la neutralidad e incrementando de forma proporcional el contenido de materia orgánica y la retención hídrica edáfica.

La incorporación de la mezcla LP-ACU estimuló de manera sostenida la actividad metabólica global y el crecimiento de la microbiota edáfica bajo el cultivo de *Zea mays*, se registró un comportamiento dependiente de la dosis y del tiempo que alcanzó su máxima expresión cuantitativa a los 117 días post-aplicación con la dosis de 25 Mg/ha.

Se convalida la consistencia analítica y la complementariedad entre los métodos indirectos de Fumigación-Incubación (FI) y Respiración Inducida por Sustrato (SIR) para el monitoreo biológico del suelo, sustentada en una robusta correlación lineal positiva $r_s > 0,80$ a lo largo del ciclo experimental.

Contribución y autoría

PG: conceptualización, investigación (fase experimental de campo y laboratorio), análisis formal, validación, software (procesamiento estadístico) y redacción del borrador original.

AA: conceptualización, metodología, supervisión, administración del proyecto, adquisición de fondos, provisión de recursos analíticos y logísticos, revisión crítica y edición final del manuscrito. Todos los autores aprueban la versión final del manuscrito.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada parcialmente por el Departamento de Química de la Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología (FACYT) de la Universidad de Carabobo y mediante el apoyo logístico e infraestructural de la Gerencia de Investigación y Desarrollo de Industrias Diana C.A.. Los financiadores no tuvieron participación en el diseño del estudio, la recolección y análisis de datos, la decisión de publicar ni la preparación del manuscrito.

Declaración ética

Los autores declaran que este estudio no involucró participantes humanos, ensayos clínicos ni experimentación directa con animales vivos; por lo tanto, no requirió la aprobación formal de un comité de bioética institucional. La recolección de muestras de suelo agrícola y el manejo de los pasivos industriales (lodo paplero y aceite comestible usado) se ejecutaron bajo el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes en la República Bolivariana de Venezuela (Decreto N° 2.216 sobre Manejo de Residuos Sólidos y Decreto N° 2.635 sobre Control de Materiales Peligrosos) y los protocolos internos de bioseguridad industrial de las entidades colaboradoras.

Uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que durante la preparación de este trabajo no se utilizaron herramientas de Inteligencia Artificial Generativa (IA) ni tecnologías asistidas por IA para la generación, alteración o creación de datos primarios o conclusiones. Los autores declaran responsabilidad total sobre el contenido científico expresado en este documento.

Disponibilidad de datos

Los datos anonimizados que respaldan los resultados de este artículo están disponibles a solicitud razonable contactando directamente al autor de correspondencia.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses financieros, comerciales, políticos o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada, sesgada o directa en el desarrollo de la investigación o la redacción final de este manuscrito científico.

Referencias

- [1] W. Zhang, Y. Xiong, Y. Li, Y. Qiu, y G. Huang, «Effects of organic amendment incorporation on maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water-fertilizer productivity under arid conditions», *Agricultural Water Management*, vol. 269, p. 107663, jul. 2022, doi: 10.1016/j.agwat.2022.107663.
- [2] A. Biswas, «From Waste to Biofuels: Microbial Revalorization of Agro-industrial Left-Overs», en *Agro-waste to Microbe Assisted Value Added Product: Challenges and Future Prospects*, S. P. Saha, D. Mazumdar, S. Roy, y P. Mathur, Eds., en Environmental Science and

- Engineering, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 39-59. doi: 10.1007/978-3-031-58025-3_2.
- [3] A. Tumma, P. Dujjanutat, P. Muanruksa, J. Winterburn, y P. Kaewkannetra, «Biocircular platform for renewable energy production: Valorization of waste cooking oil mixed with agricultural wastes into biosolid fuels», *Energy Conversion and Management: X*, vol. 15, p. 100235, ago. 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100235.
- [4] S. Bhunia, A. Bhowmik, R. Mallick, y J. Mukherjee, «Agronomic Efficiency of Animal-Derived Organic Fertilizers and Their Effects on Biology and Fertility of Soil: A Review», *Agronomy*, vol. 11, n.º 5, p. 823, abr. 2021, doi: 10.3390/agronomy11050823.
- [5] M. V. Semenov, A. D. Zhelezova, N. A. Ksenofontova, E. A. Ivanova, D. A. Nikitin, y V. M. Semenov, «Microbiological Indicators for Assessing the Effects of Agricultural Practices on Soil Health: A Review», *Agronomy*, vol. 15, n.º 2, p. 335, ene. 2025, doi: 10.3390/agronomy15020335.
- [6] K. Rasa *et al.*, «Pulp and paper mill sludges decrease soil erodibility», *J of Env Quality*, vol. 50, n.º 1, pp. 172-184, ene. 2021, doi: 10.1002/jeq2.20170.
- [7] S. Adithya, S. A. D. Nunna, C. Chinnadurai, y D. Balachandar, «Effects of rice cropping method and growth stage on rhizosphere bacterial diversity and soil biological attributes», *Pedosphere*, vol. 35, n.º 6, pp. 983-994, dic. 2025, doi: 10.1016/j.pedsph.2024.08.010.
- [8] S. Adithya, S. A. D. Nunna, C. Chinnadurai, y D. Balachandar, «Effects of rice cropping method and growth stage on rhizosphere bacterial diversity and soil biological attributes», *Pedosphere*, vol. 35, n.º 6, pp. 983-994, dic. 2025, doi: 10.1016/j.pedsph.2024.08.010.
- [9] Á. Velasco-Sánchez, N. Bennegadi-Laurent, I. Trinsoutrot-Gattin, J. W. Van Groenigen, y G. Y. K. Moinet, «Soil microorganisms increase Olsen phosphorus from poorly soluble organic phosphate: A soil incubation study», *Soil Use and Management*, vol. 40, n.º 1, p. e12960, ene. 2024, doi: 10.1111/sum.12960.
- [10] N. Azadi y F. Raiesi, «Biochar alleviates metal toxicity and improves microbial community functions in a soil co-contaminated with cadmium and lead», *Biobar*, vol. 3, n.º 4, pp. 485-498, dic. 2021, doi: 10.1007/s42773-021-00123-0.

- [11] N. Meyer *et al.*, «Living, dead, and absent trees—How do moth outbreaks shape small-scale patterns of soil organic matter stocks and dynamics at the Subarctic mountain birch treeline?», *Global Change Biology*, vol. 28, n.º 2, pp. 441-462, ene. 2022, doi: 10.1111/gcb.15951.
- [12] N. Uzinger *et al.*, «Fertility Impact of Separate and Combined Treatments with Biochar, Sewage Sludge Compost and Bacterial Inocula on Acidic Sandy Soil», *Agronomy*, vol. 10, n.º 10, p. 1612, oct. 2020, doi: 10.3390/agronomy10101612.
- [13] D. Ghosh, M. Mandal, y S. Kr. Pattanayak, «Long Term Effect of Integrated Nutrient Management on Dynamics of Phosphorous in an Acid *Inceptisols* of Tropical India», *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 52, n.º 19, pp. 2289-2303, oct. 2021, doi: 10.1080/00103624.2021.1924186.
- [14] L. Zhang *et al.*, «Soil labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after 10 years of continuous fertilization and wheat residue incorporation», *Sci Rep*, vol. 10, n.º 1, p. 11318, jul. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-68163-3.
- [15] J. Zhou *et al.*, «Strong priming of soil organic matter induced by frequent input of labile carbon», *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 152, p. 108069, ene. 2021, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.108069.
- [16] L. Jiang, B. Xu, y Q. Wang, «Functional Characteristics and Cellulose Degradation Genes of the Microbial Community in Soils with Different Initial pH Values», *Agriculture*, vol. 15, n.º 10, p. 1068, may 2025, doi: 10.3390/agriculture15101068.

Descargo de responsabilidad

Los artículos publicados en la revista **Saastal** representan únicamente las opiniones de los autores. La Editorial Unión Científica, su equipo editorial y sus revisores no se hacen responsables del contenido, las interpretaciones o las consecuencias derivadas de la aplicación de los métodos o conclusiones incluidas en los trabajos. Todas las publicaciones se rigen por las políticas éticas de la editorial.