

Parámetros microbiológicos en sustratos agrícolas elaborados con diferentes residuos orgánicos

Minerva Márquez^{1*}; Arnaldo Armado²; Geraldine Rodríguez³; Jorge Briceño⁴;
Mónica Silva⁵; Daniela Avalos⁶; Marcelo Rojas⁷

Resumen

Algunos de los parámetros microbiológicos adecuados para evaluar la actividad biológica son la respiración basal y biomasa microbiana, ya que responden rápidamente ante los cambios de condiciones y son propiedades importantes utilizadas como indicadores de calidad en suelos. Este estudio propone evaluar estas dos propiedades, en mezclas de materiales orgánicos, para ser empleadas como indicador de calidad en la preparación de sustratos agrícolas. Se prepararon mezclas con seis desechos orgánicos diferentes, en dos proporciones, utilizando suelo/aserrín y arena/aserrín como base. En cada mezcla se evaluaron parámetros químicos y microbiológicos. Los valores de pH y conductividad obtenidos se utilizaron como criterio de descarte comparándolos con los aceptados, según la literatura. Se realizó un análisis estadístico de correlación y un análisis de componentes principales, se determinó que las mezclas con borra de café al 40% (base suelo o base arena), lodo paplero al 30% (base suelo), lignito al 20% y dolomita al 5% en base arena, presentan condiciones adecuadas para el desarrollo de cultivos de hortalizas.

Palabras clave: compost, cultivo de hortalizas, indicadores de calidad, parámetros microbiológicos.

Microbiological parameters in agricultural substrates produced with different organic waste

Abstract

Some of the microbiological parameters suitable for assessing biological activity are basal respiration and microbial biomass, as they respond rapidly to changes in conditions and are important properties used as quality indicators in soils. This study proposes evaluating these two properties in mixtures of organic materials for use as quality indicators in the preparation of agricultural substrates. Mixtures were prepared with six different organic wastes in two proportions, using soil/sawdust and sand/sawdust as bases. Chemical and microbiological parameters were evaluated in each mixture. The pH and conductivity values obtained were used as exclusion criteria, comparing them with those accepted in the literature. A statistical correlation analysis and a principal component analysis were performed, determining that the mixtures with 40% coffee grounds (soil or sand base), 30% paper mill sludge (soil base), 20% lignite, and 5% dolomite (sand base) present adequate conditions for the development of vegetable crops.

Keywords: : compost, vegetable cultivation, quality indicators, microbiological parameters.

Recibido: 26 de julio de 2025
Aceptado: 28 de noviembre de 2025

¹ Laboratorio de Investigaciones Bioquímicas, Suelo y Ambiente (LIBSA), Centro de Investigaciones en Ambiente, Biología y Química (AMBIOQUIM), Departamento de Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo. Avenida Salvador Allende, Ciudad Universitaria, Edificio Departamento de Química. Naganagua, Carabobo, mmarquez10@uc.edu.ve, <https://orcid.org/0009-0006-9770-8209>. *Autor de correspondencia

² Laboratorio de Investigaciones Bioquímicas, Suelo y Ambiente, LIBSA, Centro de Investigaciones en Ambiente, Biología y Química, AMBIOQUIM, Departamento de Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, armadoa@uc.edu.ve, <https://orcid.org/0000-0003-4670-0339>

³ Laboratorio de Investigaciones Bioquímicas, Suelo y Ambiente, LIBSA, Centro de Investigaciones en Ambiente, Biología y Química, AMBIOQUIM, Departamento de Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Gggeraldinee2@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5738-3633>.

⁴ Campus Académico "Alpachaca" Av. Ernesto Che Guevara s/n y Av. Gabriel Secaira. Universidad Estatal de Bolívar, Guaranda, Ecuador, jbriceno@ueb.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-0692-1228>

⁵ Universidad Técnica de Ambato. Laboratorio de alimentos funcionales. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, FCIAB, mdp.silva@uta.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-8887-1553>

⁶ Campus Académico "Alpachaca" Av. Ernesto Che Guevara s/n y Av. Gabriel Secaira. Universidad Estatal de Bolívar, Guaranda, daniela.avalos@ueb.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-7184-3318>

⁷ Campus Académico "Alpachaca" Av. Ernesto Che Guevara s/n y Av. Gabriel Secaira. Universidad Estatal de Bolívar, Guaranda, Ecuador, mrojas@ueb.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-9694-3817>

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de la agricultura un sustrato es conocido como todo aquel material distinto al suelo, de origen orgánico o de síntesis mineral que colocado sobre un recipiente solo o mezclado, proporciona a la semilla las condiciones necesarias para su germinación, enraizamiento, anclaje y crecimiento (Guerrero Guerrero, 2020).

La cantidad de materiales que pueden ser utilizados como sustratos es muy amplia. Es habitual que se usen mezclas de distintos materiales para obtener características apropiadas de acuerdo con el tipo de cultivo. Entre los sustratos comunes comercialmente se tiene la turba, lana de roca, perlita, entre otros. Sin embargo, estos pueden ser importados y poseen precios elevados, por lo que se han realizado estudios destinados a aprovechar otras materias primas de elaboración local para disminuir costos y facilitar su adquisición (de Celis et al., 2024; Kader et al., 2022).

En la actualidad existen muchos residuos orgánicos con grandes cantidades de carbono que pueden ser utilizados como componente de un sustrato favorable, que se adapte a las condiciones requeridas por los productores agrícolas y contribuya a una mejor disposición de desechos, minimizando los efectos negativos que esos residuos puedan ocasionar sobre el medioambiente (Guerrero-Brotons et al., 2024; Normi & Baidurah, 2024).

El aprovechamiento de los residuos agrícolas se alinea estrechamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS, puesto que promueven tecnologías neutrales en carbono para la gestión de desechos. Se han analizado las tendencias tecnológicas en la valorización de residuos agrícolas mediante procesos como el compostaje, la conversión térmica y la digestión anaerobia. Específicamente se ha usado el biochar y la adición de compuestos como calcio, magnesio y fosfatos para acelerar la pasivación de Elementos Potencialmente Tóxicos, EPTs y transformar el fósforo en formas biodisponibles para las plantas (Xu et al., 2024).

Los residuos orgánicos son susceptibles de ser aprovechados como fertilizantes mediante un proceso previo de biooxidación, biodegradación y estabilización de la materia orgánica por acción de microorganismo (descomposición biológica), bajo un control de temperatura y humedad, produciendo

materia orgánica y preservación de nutrimentos que pueden proporcionar una mejor calidad al suelo o los sustratos (Chen et al., 2024).

Los microorganismos cumplen una función importante en la descomposición de los residuos orgánicos, influyen sobre los ecosistemas, fertilidad y nutrientes del suelo, intervienen en el establecimiento de los ciclos biogeoquímicos, y además son indicadores clave en los cambios del suelo, así como en la calidad ambiental de los mismos (Paolini Gomez, 2018).

Las propiedades microbiológicas del suelo, en este caso de estudio específicamente de los sustratos que contienen como base suelo o arena, responden de forma rápida y sensible a los cambios de sus condiciones mucho antes que el carbono orgánico, por ende, suministra una información anticipada sobre la calidad de estos (Fierer et al., 2021).

Entre los parámetros microbiológicos adecuados para evaluar la actividad biológica se tienen, la respiración basal y la biomasa microbiana, los cuales se miden de forma indirecta mediante la producción de CO₂ liberado por los microorganismos presentes en el sistema. La respiración es donde los sustratos orgánicos se oxidan y se convierten en dióxido de carbono por la acción de los microorganismos presentes. Resultando ser de gran importancia en el cierre el ciclo del carbono en los ecosistemas terrestres, regresando a la atmósfera en forma de CO₂ (Pardo-Plaza et al., 2019).

La biomasa microbiana se refiere al componente vivo de los materiales orgánicos en un sistema, representando la totalidad de los microorganismos presentes en el suelo o sustrato (tamaño de la comunidad microbiana). Generalmente, se consideran como indicadores de fertilidad y calidad del suelo (Garbowski et al., 2023).

Existe un gran número de investigaciones acerca de las propiedades microbiológicas de suelos. Sin embargo, hay muy poca información sobre estas propiedades en sustratos empleados a nivel agrícola. El objetivo principal de este estudio fue evaluar la respiración basal y carbono de la biomasa microbiana en sustratos agrícolas para hortalizas a fin de lograr un mejor aprovechamiento de los diferentes residuos orgánicos y conocer las condiciones microbiológicas de cada sustrato propuesto para la producción de plántulas de calidad.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1. Preparación de las muestras: Los sustratos se prepararon en dos proporciones distintas para cada mezcla, empleando como base suelo- aserrín y arena-aserrín, dejando la cantidad de aserrín fija. Se emplearon mezclas de materiales orgánicos e inorgánicos de orígenes diversos como suelo, arena, aserrín, compost, aceite comestible usado (ACU), lodo papelero, cama agotada de champiñones (CACHA), lignito, borra de café y

dolomita. Se obtuvieron un total de 24 sustratos (tratamientos) de 500 g con tres réplicas de cada uno y la composición utilizada se describe en la TABLA 1.

Las muestras fueron preparadas en bolsa de polietileno, se humedecieron y cerraron bien con un espesor menor a 20 cm, se cubrieron con una lámina de plástico y se dejaron 4 semanas expuestas al sol, para su desinfección, según el método de solarización húmeda (Mauromicale et al., 2005).

Tabla 1. Composición porcentual de los materiales orgánicos e inorgánicos empleados en la preparación de los sustratos.

Mezclas	Material	Composición (%)	
		1	2
M1	Arena / Suelo	20	50
	Aserrín	10	10
	Compost	70	40
M2	Arena / Suelo	20	50
	Aserrín	10	10
	Borra de café	70	40
M3	Arena/ Suelo	20	50
	Aserrín	10	10
	CACHA	70	40
M4	Arena / Suelo	20	50
	Aserrín	10	10
	Compost	67	35
	ACU	3	5
M5	Arena / Suelo	20	50
	Aserrín	10	10
	Compost	40	15
	Lignito	20	20
	Dolomita	10	5
M6	Arena / Suelo	20	50
	Aserrín	10	10
	Compost	50	10
	Lodo papelero	20	30

CACHA: Cama agotada de champiñones; ACU: Aceite comestible usado.

II.2. Propiedades químicas: En la determinación del pH y conductividad eléctrica se empleó una proporción sustrato-agua 1:2. Para sustratos agrícolas en hortalizas los valores aceptados de acuerdo con las referencias bibliográficas son: pH (5,5-6,8) y CE < 3,5 mScm⁻¹ (Monsalve Camacho et al., 2021). Las mezclas M1, M3, M4.1, M6.1, M4.2 en base arena-aserrín, se descartaron por presentar altos valores de conductividad (>3,5). Además, se descartaron las

mezclas M2.1 por tener pH muy ácido (<5) y M6.2 en base arena-aserrín por presentar pH mayor a 6,8, ya que puedan afectar la asimilación de nutrientes. A las mezclas cuyos valores de pH y CE se encontraban dentro de los permisibles según la bibliografía, se procedió a realizar los análisis específicos de respiración basal y carbono de la biomasa microbiana como indicadores de calidad (Sharma et al., 2023).

II.3. Propiedades microbiológicas: A las mezclas cuyos valores de pH y CE se encontraban dentro de los permisibles según las referencias bibliográficas, se determinó la respiración basal y carbono de la biomasa microbiana (Paolini Gomez, 2018). Para la respiración basal se usaron 20 g de muestra, se humedeció hasta un 60% de su capacidad de retención de agua, se incubó a temperatura ambiente durante 7 días colocando un vial con 20 mL de hidróxido de sodio 0,5 M; por su parte para la biomasa microbiana, mediante el método de respiración inducida por sustrato (RIS), se utilizó la misma muestra de suelo (20 g) del experimento de respiración basal y se le añadió 1 mL de una solución de glucosa al 8%, se dejó reposar a temperatura ambiente durante 2 horas, luego se le colocó un vial con 10 mL de hidróxido de sodio 0,05 M incubándose durante 4 horas. En ambos casos el CO₂ desprendido se tituló con HCl, usando fenolftaleína como indicador luego de precipitar carbonatos con BaCl₂.

II.4. Análisis estadístico: En esta investigación se empleó el software libre Past versión 3.12. Primero se verificó que los datos eran paramétricos al realizar una prueba de normalidad y homogeneidad de varianza, empleando Shapiro Wilk y Bartlett respectivamente; luego se obtuvo un resumen estadístico, comparación

de medias entre tratamientos mediante la prueba de Tukey ($p < 0,05$), correlación y un análisis de componentes principales (ACP).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un buen sustrato debe cumplir ciertas especificaciones para poder ser aceptado en actividades agrícolas. Los sustratos tienen que ser estables químicamente, de baja salinidad y pH ligeramente ácido, es decir, los resultados están en un intervalo aceptable (Wang et al., 2020). En el caso del pH los valores se encuentran entre ($5,43 \pm 0,05$) y ($6,74 \pm 0,02$), mientras que los valores de conductividad eléctrica varían desde ($1,33 \pm 0,05$) a ($3,65 \pm 0,08$) mScm⁻¹ (Tabla 2 y Fig.1). El análisis de varianza y la prueba de Tukey señalan que existe diferencia significativa ($p < 0,05$) entre los tratamientos. Esta variabilidad es influenciada por los componentes de la mezcla en cada sustrato, debido a la formación y presencia de sustancias húmicas resultantes de la descomposición de los materiales orgánicos (Guerrero Guerrero, 2020).

En suelos y sustratos su actividad depende de la cantidad de carbono disponible y el material que se utilice. En la TABLA 2 y Fig. 2, se muestran los resultados de las propiedades microbiológicas en los diferentes sustratos.

Tabla 2. Valores de los parámetros determinados a los diferentes sustratos.

Sustrato	Composición	pH±ES	CE±ES (mScm ⁻¹)	RB±ES (mgC-CO ₂ KgS ⁻¹ d ⁻¹)	BM±ES (mg Cmic Kg ⁻¹)	qCO ₂ ±ES (mg C-CO ₂ mg Cmic ⁻¹ d ⁻¹)
M2.2 S	Suelo 50%, café 40%, aserrín 10%	5,43 ± 0,05	1,33 ± 0,05	65±5	149±13	0,42±0,04
M2.2 A	Arena 50%, café 40%, aserrín 10%	5,66 ± 0,09	2,6 ± 0,1	93±4	255±20	0,38±0,03
M4.2 S	Suelo 50%, compost 35%, ACU 5%, aserrín 10%	6,74 ± 0,02	3,65 ± 0,08	54±3	91±12	0,58±0,06
M5.1 S	Suelo 20%, compost 40%, lignito 20%, dolomita 10% aserrín 10%	5,87 ± 0,06	3,4 ± 0,1	57±3	97±8	0,62±0,05
M5.1 A	Arena 20%, compost 40%, lignito 20%, dolomita 10% aserrín 10%	6,40 ± 0,06	3,5 ± 0,3	30±3	68±7	0,42±0,04
M5.2 S	Suelo 50%, compost 15%, lignito 20%, dolomita 5% aserrín 10%	6,17 ± 0,07	1,63 ± 0,03	37±4	64±9	0,54±0,08
M5.2 A	Arena 50%, compost 15%, lignito 20%, dolomita 5% aserrín 10%	5,88 ± 0,06	1,84 ± 0,08	28±3	106±12	0,25±0,04
M6.2 S	Suelo 50%, compost 10%, LP 30%, aserrín 10%	6,05 ± 0,10	2,73 ± 0,09	77±5	137±12	0,60±0,07

Número de réplicas: 9; CE: Conductividad eléctrica; ES: Error estándar; S: Suelo; A: Arena; RB: Respiración basal; BM: Carbono de la biomasa microbiana; qCO₂: Coeficiente metabólico.

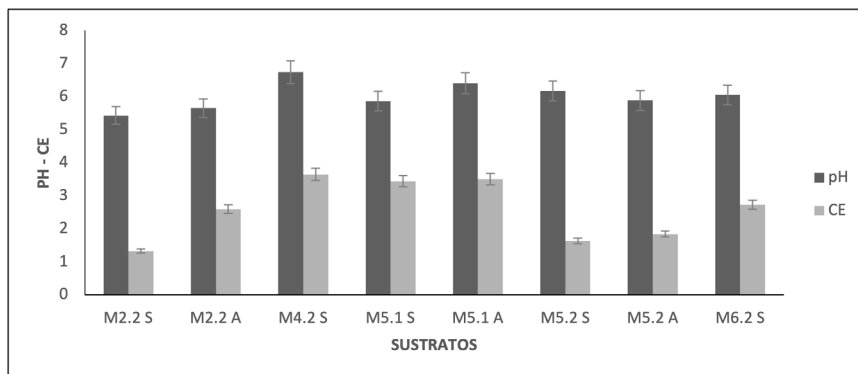


Figura. 1. Representación gráfica de los resultados de pH y conductividad eléctrica (CE).

La variedad de los resultados muestra la sensibilidad de las variables respuestas ante el material orgánico empleado en los sustratos evaluados, según el análisis de varianza existe diferencias significativas entre las medias de los tratamientos. En otras palabras, la cantidad y calidad de materia orgánica presente en cada mezcla son responsables de esta variación.

Las mezclas de sustratos que contienen entre sus componentes borra de café (M2.2) y lodo paplero (M6.2) mostraron los valores más altos en la respiración basal y el carbono de la biomasa microbiana, indicando que existe un mayor

desprendimiento de CO_2 debido a la actividad de los microorganismos presentes. Se ha reportado que la capacidad de los microorganismos para degradar residuos orgánicos depende del material y del contenido de carbono orgánico presente, así como también de la presencia de materia orgánica lábil (Dash & Kujur, 2024; Yang et al., 2023).

Los menores valores de respiración basal (TABLA 2 y Fig. 2), se obtuvieron en los sustratos que contienen como base arena y entre sus componentes están lignito y dolomita (M5.1 y M5.2), lo que implicaría que en esas mezclas el material orgánico presente es muy estable y de difícil descomposición.

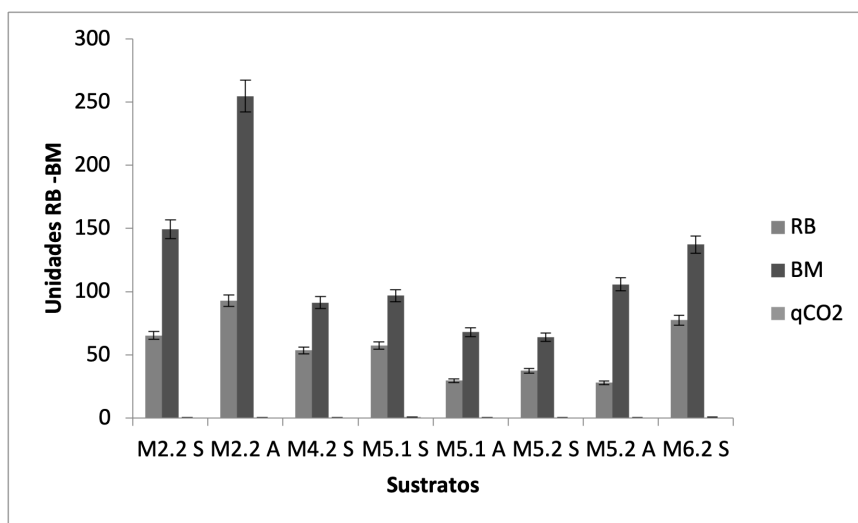


Figura. 2. Representación gráfica de los resultados de respiración basal (RB), biomasa microbiana (BM) y qCO_2 .

La respiración basal presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las mezclas que contienen como base suelo-aserrín y arena-aserrín en los casos de M2.2 y M5.1. Por su parte, en la biomasa microbiana existe diferencia significativa ($p < 0,05$) entre mezclas de distinta base (suelo-aserrín y

arena-aserrín) para los tratamientos M2.2 y M5.2. Quedando esto influenciado por la textura de la base y la capacidad que tienen para la mineralización del material orgánico. La base arenosa puede afectar la capacidad de estabilizar la materia orgánica, ya que normalmente las adiciones orgánicas se

descomponen más rápido en suelos arenosos que en otros suelos como los arcillosos (Schlüter et al., 2022).

Usualmente, la presencia de partículas arenosas causa condiciones desfavorables, lo que genera mayores valores de coeficiente metabólico y ocasiona que los microorganismos requieran mayor energía para mantener la biomasa. Sin embargo, para la mezcla compuesta por arena, aserrín, compost, lignito y dolomita (M5.2), el cociente metabólico fue de $(0,25 \pm 0,04)$ mg C-CO₂ mg Cmic-1d⁻¹, siendo el cociente menor de todos los sistemas tratados, lo que permite considerarlo como apropiado de acuerdo con este parámetro. Debido a que un menor valor de coeficiente metabólico (qCO₂), indica que los microorganismos están utilizando el carbono de manera eficiente (Ruiz-Dager & Paolini-Gomez, 2021), lo que genera un equilibrio de la comunidad microbiana, proporcionando una buena salud del suelo o sustrato.

Adicionalmente, como otras opciones favorables, se contemplan los tratamientos que contienen borra de café (M2.2), los cuales muestran altos valores tanto de RB como de BM (TABLA 2) y generan valores menores de respiración específica (coeficiente metabólico), indicando un progreso hacia su madurez (Chen et al., 2024; Yang et al., 2023). Lo que sugiere que esas mezclas establecen un ambiente biológico eficiente y saludable, existe menor estrés y gasto energético por parte de los microorganismos, indicando buenas condiciones para el desarrollo vegetal, mejor calidad biológica y un manejo orgánico adecuado, siendo un sustrato con buen desempeño agronómico, apto en prácticas agrícolas sostenibles (Cheng et al., 2024; Zavyalova et al., 2020).

Al realizar la correlación de Pearson y el análisis de componentes principales (ACP) para los parámetros evaluados se observó una relación inversa del pH con la respiración basal y la biomasa microbiana, en ciertos casos los mayores valores de las propiedades microbiológicas se obtuvieron a los pH más bajos. Por su parte la conductividad eléctrica posee un comportamiento inverso con la biomasa microbiana y una relación directa significativa ($p < 0,05$) con la respiración basal. Este hallazgo es consistente con estudios previos que sugieren que los valores más bajos de pH tienden a favorecer ciertas actividades microbiológicas, como la respiración basal, posiblemente debido a la mayor disponibilidad

de nutrientes o condiciones más adecuadas para ciertos grupos microbianos en suelos ácidos. En ciertos casos, se observó que los mayores valores de las propiedades microbiológicas se obtenían a los pH más bajos, lo que resalta la complejidad de las interacciones suelo-microorganismos y la necesidad de considerar factores adicionales, como la disponibilidad de nutrientes o la estructura del suelo (Martín-Sanz et al., 2022).

En relación con el análisis de componentes principales, como se muestra en la TABLA 3, la suma del porcentaje de varianza explicada por los dos primeros componentes principales fue del 82,78%. El hecho de que el más del 80,8% de la varianza total sea explicada por estos componentes refuerza la fiabilidad del modelo y su capacidad para capturar las principales fuentes de variabilidad en los datos. Este alto porcentaje de varianza explicada indica que los dos componentes principales seleccionados son adecuados para representar la complejidad de las interacciones entre las variables evaluadas, lo que es importante para la interpretación de los resultados y la posterior toma de decisiones (Liu et al., 2023).

Tabla 3. Autovalores y varianza para los componentes principales

CP	Autovalor	Varianza (%)
1	252,65	50,53
2	16,13	32,25
3	0,64	12,78
4	0,22	4,31
5	0,01	0,13

CP: componente principal

En la Fig. 3.a se muestra que existe una alta correlación directa del pH e inversa de la biomasa microbiana (BM) con respecto al componente principal 1. Por su parte la Fig. 3.b muestra una mayor correlación de la respiración basal (RB) y qCO₂ con respecto al segundo componente.

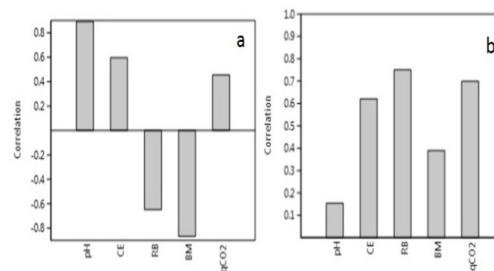


Figura 3. Correlación de análisis de componentes principales. a) respecto al componente 1. b) respecto al componente 2.

En términos agronómicos, un qCO_2 más bajo significa que la comunidad microbiana en el sustrato está haciendo un mejor uso del carbono, destinando más energía al crecimiento y a la actividad funcional, y menos al mantenimiento. Esto resulta en un ambiente más resiliente y biológicamente estable, con menos perturbaciones. En la práctica, esto implica que el sustrato tiene una mayor capacidad para sostener los cultivos al liberar nutrientes de manera más gradual y continua, lo cual reduce las pérdidas por descomposición descontrolada o mineralización rápida (Ruiz-Dager & Paolini, 2025; Wilson et al., 2024).

En consecuencia, los sustratos con un bajo qCO_2 son más efectivos en transformar y poner los nutrientes a disposición de las plantas, y representan una mejor opción para métodos agrícolas sostenibles, especialmente en la producción de hortalizas y plántulas que tienen necesidades particulares respecto a la calidad biológica del medio de cultivo (Ma et al., 2024).

Por otro lado, la Fig. 4 señala la combinación de todas las variables mediante vectores.

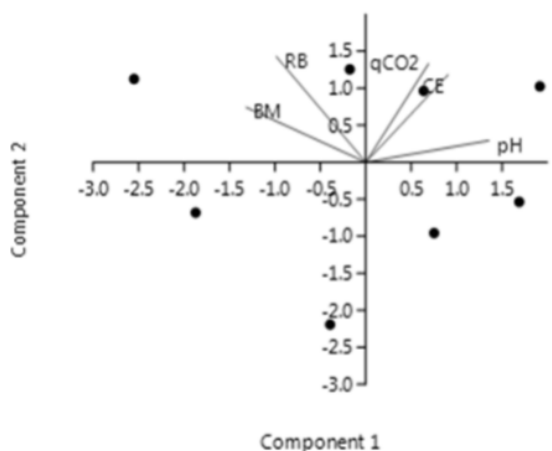


Figura 4. Gráfico de ACP que combina la representación de las variables

Se verificó que de los sustratos preparados resultaron adecuados para el desarrollo de cultivos de hortalizas las mezclas M2.2 A (Arena 50%, café 40%, aserrín 10%) que contienen borra de café, M6.2 S (Suelo 50%, compost 10%, LP 30%, aserrín 10%) lodo papелero, indicados por los vectores y mayores valores de la respiración basal y la biomasa microbiana; M5.1 S (Suelo 20%, compost 40%, lignito 20%, dolomita 10% aserrín 10%), M4.2 S (Suelo 50%, compost 35%, ACU 5%, aserrín 10%),

indicados por las otras variables con respecto al segundo componente.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados del estudio, evaluados mediante métricas microbiológicas sensibles como la respiración basal y el carbono de la biomasa microbiana, ofrecen evidencia científica sobre la viabilidad de utilizar residuos orgánicos locales en la elaboración de sustratos agrícolas de alta calidad. Específicamente, se encontraron mezclas con un bajo cociente metabólico, lo que indica que la población microbiana utiliza el carbono de manera más eficiente, dando lugar a sistemas más estables y ambientalmente sostenibles. Al valorizar los residuos agroindustriales, esta eficiencia microbiana aporta de manera significativa a la creación de sustratos sustitutos que reducen la necesidad de materiales costosos o importados al tiempo se alinean con los principios de la economía circular.

A través del análisis estadístico de los resultados empleados como indicadores de calidad, respiración basal y carbono de la biomasa microbiana, se puede decir que de los sustratos preparados los más adecuados para el desarrollo de cultivos de hortalizas se tienen las mezclas compuestas por borra de café (base suelo o base arena), lodo papелero (base suelo) y lignito/dolomita (5%) en base arena, mientras que los demás tratamientos no cumplieron con las condiciones mínimas favorables para la elaboración de sustratos agrícolas.

Se recomienda a los productores agrícola considerar el uso de mezclas basadas en residuos de café, desechos de fábricas de papel y lignito/dolomita (en las proporciones especificadas en este estudio). Se ha demostrado que estas opciones cumplen con los requisitos fisicoquímicos y microbiológicos adecuados, al mismo tiempo que mejoran la calidad del cultivo y reducen los efectos ambientales negativos de las actividades agrícolas.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chen, P., Wang, L., Li, W., Zhang, X., Gao, H., Zhou, X., Zhuang, Q., Li, J., Li, X., & Zhang, A. (2024). Micro-biological degradation and transformation of dissolved organic matter following continuous cropping of tobacco. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1319895>

- Cheng, S., Xue, W., Gong, X., Hu, F., Yang, Y., & Liu, M. (2024). Reconciling plant and microbial ecological strategies to elucidate cover crop effects on soil carbon and nitrogen cycling. *Journal of Ecology*, 112(12), 2901–2916. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14431>
- Dash, S., & Kujur, M. (2024). Contribution of Organic Carbon, Moisture Content, Microbial Biomass-Carbon, and Basal Soil Respiration Affecting Microbial Population in Chronosequence Manganese Mine Spoil. *Nature Environment and Pollution Technology*, 23(4), 2315–2323. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2024.v23i04.035>
- de Celis, M., de Sosa, L. L., Picca, G., González-Polo, N., Gómez-Ruano, C., Beneduce, L., Zacccone, C., & Pannettieri, M. (2024). *Alternative organic substrates enhance tomato growth in rooftop farming by promoting specific microbial communities*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5431099/v1>
- Fierer, N., Wood, S. A., & Bueno de Mesquita, C. P. (2021). How microbes can, and cannot, be used to assess soil health. *Soil Biology and Biochemistry*, 153, 108111. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108111>
- Garbowski, T., Bar-Michalczyk, D., Charazińska, S., Grabowska-Polanowska, B., Kowalczyk, A., & Lochyński, P. (2023). An overview of natural soil amendments in agriculture. *Soil and Tillage Research*, 225, 105462. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105462>
- Guerrero-Brotons, M., Perujo, N., Romani, A. M., & Gómez, R. (2024). Advantages of using a carbon-rich substrate in a constructed wetland for agricultural water treatment: Carbon availability and biota development. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 360, 108792. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108792>
- Guerrero Guerrero, E. M. (2020). Evaluación de sustratos bajo un sistema hidropónico en un cultivo de fresa con variables de calidad. *Informador Técnico*, 85(1), 52–63. <https://doi.org/10.23850/22565035.2922>
- Kader, S. A., Spalevic, V., & Dudic, B. (2022). Feasibility study for estimating optimal substrate parameters for sustainable green roof in Sri Lanka. *Environment, Development and Sustainability*, 26(1), 2507–2533. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02837-y>
- Liu, J., Kang, H., Tao, W., Li, H., He, D., Ma, L., Tang, H., Wu, S., Yang, K., & Li, X. (2023). A spatial distribution – Principal component analysis (SD-PCA) model to assess pollution of heavy metals in soil. *Science of The Total Environment*, 859, 160112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160112>
- Ma, Z., Liang, T., Fu, H., Ma, Q., Chang, D., Zhang, J., Che, Z., Zhou, G., & Cao, W. (2024). Long-term green manuring increases soil carbon sequestration via decreasing qCO₂ caused by lower microbial phosphorus limitation in a dry land field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 374, 109142. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109142>
- Martín-Sanz, J. P., de Santiago-Martín, A., Valverde-Asenjo, I., Quintana-Nieto, J. R., González-Huecas, C., & López-Lafuente, A. L. (2022). Comparison of soil quality indexes calculated by network and principal component analysis for carbonated soils under different uses. *Ecological Indicators*, 143, 109374. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109374>
- Mauromicale, G., Monaco, A. Lo, Longo, A. M. G., & Restuccia, A. (2005). Soil solarization, a nonchemical method to control branched broomrape (*Orobancha ramosa*) and improve the yield of greenhouse tomato. *Weed Science*, 53(6), 877–883. <https://doi.org/10.1614/WS-05-023R1.1>
- Monsalve Camacho, O. I., Henao Toro, M. C., & Gutiérrez Díaz, J. S. (2021). Caracterización de materiales con uso potencial como sustratos en sistemas de cultivo sin suelo. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 22(1). https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1977
- Normi, S. S. M., & Baidurah, S. (2024). Transforming Food Waste into Nutrient-Rich Fertilizer: A Sustainable Path Towards Carbon Neutrality and Circular Economy. In *Biomass Valorization* (pp. 261–292). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8557-5_12

- Paolini Gomez, J. E. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 36(1), 13. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>
- Pardo-Plaza, Y. J., Paolini Gómez, J. E., & Cantero-Guevara, M. E. (2019). Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1144>
- Ruiz-Dager, M., & Paolini-Gomez, J. E. (2021). Indicadores biológicos de suelos lacustres y aluviales de Venezuela bajo diferentes usos. Parte 1. Actividad microbiana y coeficientes ecofisiológicos. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.922>
- Ruiz-Dager, M., & Paolini, J. (2025). Correlations between enzymatic activities and microbiological parameters in lacustrine and alluvial soils of Venezuela under different land use. *STUDIES IN ENVIRONMENTAL AND ANIMAL SCIENCES*, 6(2), e17063. <https://doi.org/10.54020/seasv6n2-003>
- Schlüter, S., Roussety, T., Rohe, L., Guliyev, V., Blagodatetskaya, E., & Reitz, T. (2022). Land use impact on carbon mineralization in well aerated soils is mainly explained by variations of particulate organic matter rather than of soil structure. *SOIL*, 8(1), 253–267. <https://doi.org/10.5194/soil-8-253-2022>
- Sharma, S., Lishika, B., Shubham, & Kaushal, S. (2023). Soil Quality Indicators: A Comprehensive Review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(22), 315–325. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i224139>
- Wang, H., Garg, A., Zhang, X., Xiao, Y., & Mei, G. (2020). Utilization of coconut shell residual in green roof: hydraulic and thermal properties of expansive soil amended with biochar and fibre including theoretical model. *Acta Geophysica*, 68(6), 1803–1819. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00492-3>
- Wilson, G., Johnson, O., & Brown, W. (2024). *The Impact of Artificial Intelligence on Digital Marketing Strategies*. <https://doi.org/10.20944/preprints202408.0276.v1>
- Xu, Q., Zhang, T., Niu, Y., Mukherjee, S., Abou-Elwafa, S. F., Nguyen, N. S. H., Al Aboud, N. M., Wang, Y., Pu, M., Zhang, Y., Tran, H. T., Almazroui, M., Hooda, P. S., Bolan, N. S., Rinklebe, J., & Shaheen, S. M. (2024). A comprehensive review on agricultural waste utilization through sustainable conversion techniques, with a focus on the additives effect on the fate of phosphorus and toxic elements during composting process. *Science of The Total Environment*, 942, 173567. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173567>
- Yang, Y., Cheng, S., Fang, H., Guo, Y., Li, Y., & Zhou, Y. (2023). Interactions between soil organic matter chemical structure and microbial communities determine the spatial variation of soil basal respiration in boreal forests. *Applied Soil Ecology*, 183, 104743. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104743>
- Zavvalova, N. E., Vasbieva, M. T., & Fomin, D. S. (2020). Microbial Biomass, Respiratory Activity and Nitrogen Fixation in Soddy-Podzolic Soils of the Pre-Urals Area under Various Agricultural Uses. *Eurasian Soil Science*, 53(3), 383–388. <https://doi.org/10.1134/S1064229320030126>