

Evaluation of the Biological and Chemical Stability of Different Composts as Inoculum in Aerobic Biodegradation Tests

Evaluación de la estabilidad biológica y química de distintos compost como inóculo en ensayos de biodegradación aerobia.

Ronaldo Ademir Bonilla Laguado. ¹ , Héctor Samuel Villada Castillo. ² , Jhon Jairo Palechor Trochez. ² 

¹ Universidad del Cauca; rabonilla@unicauca.edu.co

² Universidad del Cauca2; villada@unicauca.edu.co

² Universidad del Cauca2; jipalechor@unicauca.edu.co

* Autor de correspondencia; rabonilla@unicauca.edu.co

Recibido: 20/08/2024

Aceptado: 02/11/2024

Fecha de Publicación: 27/11/2024



Derechos de autor: © 2024

Resumen: La estabilidad biológica y química del compost es fundamental en las pruebas de biodegradación de materiales plásticos. En este estudio, se evaluaron tres compost de diferente composición y procedencia: Finca La Rejoya, Granja Integral Mamá Lombriz y un compost comercial (Abonisa). La estabilidad biológica se analizó mediante un ensayo de germinación con semillas de maíz nativas, pruebas de tolerancia de plántulas de trigo (evaluando rendimiento de semillas, altura, longitud de raíces e índice de clorofila) y la cuantificación de dióxido de carbono (CO₂). La estabilidad química se determinó mediante el análisis de carbono orgánico total (COT), nitrógeno, relación carbono/nitrógeno (C/N), sólidos totales (SST), sólidos volátiles (STV) y pH. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los compost evaluados. El compost de la Finca La Rejoya presentó condiciones óptimas, con un índice de germinación del 88,89%, rendimiento de semillas del 95,74%, el mayor índice de clorofila (1,83), menor generación de CO₂ (150,26 mL en 48 horas), una relación C/N de 13,36 y pH de 7,11. Este estudio destaca la importancia de evaluar previamente la estabilidad del compost antes de utilizarlo en pruebas de biodegradación aerobia y concluye que el compost de la Finca La Rejoya es el más adecuado como inóculo para estas aplicaciones.

Palabras clave: Relación carbono/nitrógeno, germinación de semillas, altura de plántulas, índice de clorofila, generación de CO₂.

Abstract: The biological and chemical stability of compost is essential in biodegradation tests for plastic materials. This study evaluated the biological and chemical stability of three composts with different compositions and origins: Finca La Rejoya, Granja Integral Mamá Lombriz, and a commercial compost (Abonisa). Biological stability was assessed through a germination test using native corn seeds, tolerance tests with wheat seedlings (evaluating seed yield, plant height, root length, and chlorophyll index), and quantification of carbon dioxide (CO₂) production. Chemical stability was analyzed by measuring total organic carbon (TOC), nitrogen content, carbon/nitrogen (C/N) ratio, total solids (TS), volatile solids (VS), and pH. The results revealed statistically significant differences among the composts. The compost from Finca La Rejoya exhibited optimal conditions, with a germination rate of 88.89%, a seed yield of 95.74%, the highest chlorophyll index (1.83), the lowest CO₂ production (150.26 mL after 48 hours), a C/N ratio of 13.36, and a pH of 7.11. This study emphasizes the importance of evaluating compost stability before using it in aerobic biodegradation tests and concludes that the compost from Finca La Rejoya is the most suitable as an inoculum for such applications.

Keywords: Carbon/nitrogen ratio, seed germination, seedling height, chlorophyll index, CO₂ generation.

DOI: <https://doi.org/10.57173/ritc.v1n18a9>

1. Introducción

La evaluación de la degradación de polímeros ha evolucionado desde el uso inicial de sistemas acuosos, en los cuales la cantidad de CO₂ producido se empleaba como uno de los principales indicadores del proceso de biodegradación [1], [2], [3]. Actualmente, este enfoque ha sido adaptado a matrices sólidas como el compost, lo que dio lugar a la estandarización del método conocido como prueba de compostaje bajo condiciones controladas, destacándose los estándares ISO 14855 y ASTM D5338 [3], [4], [5].

El compostaje desempeña un rol fundamental en el manejo sostenible de los residuos orgánicos, siendo una herramienta clave para mitigar el impacto ambiental generado por materiales no biodegradables [1], [6]. Además, esta técnica es considerada una de las tecnologías más prometedoras para la gestión de residuos plásticos [4], [5], [7]. Sin embargo, la biodegradabilidad de los materiales debe ser evaluada en ambientes naturales como el compostaje para garantizar su viabilidad [5], [7], [8].

En las pruebas de biodegradación, el compost se utiliza como inóculo y debe cumplir con parámetros específicos, como un pH entre 7-9, una relación carbono/nitrógeno (C/N) de 10-40, un contenido de sólidos totales (SST) entre 50%-55% y una estabilidad biológica y química adecuada, características que dependen del proceso de elaboración del compost [1], [6], [9]. La estabilidad del compost, entendida como el grado de transformación de su fracción orgánica, es crucial [10], [11], [12]. Si el compost contiene principalmente materia orgánica recalcitrante, es considerado inestable [3], [4], [13].

Diversos métodos han sido propuestos para medir la estabilidad del compost, incluyendo propiedades físicas (temperatura, olor, color), químicas (relación C/N, sólidos volátiles, sustancias húmicas) y biológicas (producción de CO₂, germinación de semillas, actividad enzimática). Sin embargo, estos métodos aún no han sido universalmente aceptados [3], [4], [5].

El objetivo del compostaje es obtener un producto estable que pueda ser utilizado en la mejora de suelos o en pruebas de biodegradación en ambientes aeróbicos [5], [7], [13]. Un compost inestable puede generar efectos adversos, como el bloqueo biológico del nitrógeno, la disminución del oxígeno en el suelo o el aumento en la solubilidad de metales pesados [2], [6], [9]. En este contexto, el presente estudio evaluó la estabilidad biológica y química de tres tipos de compost para determinar cuál de ellos cumplía con los estándares necesarios para ser empleado como inóculo en pruebas de biodegradación aerobia de materiales de empaque a base de almidón y harina de yuca-fibra de fique, siguiendo los parámetros establecidos por la norma ISO 14855-1.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

El estudio se centró en la evaluación de la estabilidad biológica y química de tres tipos de compost de distinta composición y procedencia, así como en su influencia en la germinación de semillas nativas de maíz y trigo. Para ello, se seleccionaron compost producidos a partir de diferentes fuentes de residuos orgánicos, representando tanto prácticas de manejo local como comerciales. Asimismo, se emplearon semillas nativas provenientes del Resguardo de Rioblanco Sotará, Cauca, garantizando su relevancia para la agricultura tradicional de la región.

El primer compost fue suministrado por la compostera ubicada en la finca La Rejoja de la Universidad del Cauca, elaborado a partir de los residuos orgánicos generados en

todas las Facultades de la Universidad. El segundo compost provino de la granja integral Mamá Lombriz, ubicada en la meseta de la ciudad de Popayán, Cauca. El tercer compost, comercializado bajo el nombre de Abonisa, se compuso principalmente de residuos de heces de pollo y viruta de madera.

Los procedimientos detallados para la caracterización de los compost y las pruebas de germinación se describen a continuación.

La metodología empleada para el seguimiento y montaje de la pila de compost inició con la selección de materiales, incluyendo residuos verdes (biomasa de poda), melaza como fuente de azúcares, viruta de madera como reservorio de nitrógeno y compost inicial para aportar microorganismos. Los residuos derivados de los procesos de extrusión-soplado en el escalamiento de tecnologías biodegradables fueron trasladados a la compostera de la finca La Rejoya, donde se mezclaron con los demás componentes siguiendo estándares establecidos. La pila se formó con un diámetro de aproximadamente 6 metros y una altura de 3 metros, asegurando una distribución homogénea de los materiales para facilitar el proceso de compostaje.

El seguimiento incluyó mediciones semanales de temperatura para evaluar la actividad microbiana, registro fotográfico para documentar los cambios visibles en los residuos y análisis estructurales mediante espectroscopía FTIR. Este último permitió identificar cambios en los grupos funcionales del material y evaluar su degradación química durante el compostaje. Los datos obtenidos se analizaron en términos de variaciones térmicas, cambios estructurales y observaciones cualitativas, con el objetivo de determinar la efectividad del proceso de compostabilidad de los residuos empleados.

2.2. Estabilidad biológica

2.2.1 Test de crecimiento

En la Figura 1 se presenta los montajes experimentales. Para esta prueba, se empleó como tratamiento control un suelo tomado de los alrededores de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, el cual fue limpiado de objetos extraños y residuos vegetales, con una humedad inicial de 35,67%, medida con una balanza de humedad (PRECISA XM 50, Suiza). Se emplearon recipientes de vidrio de 15 cm de altura y 8 cm de ancho. En tres de estos recipientes se depositaron, de forma independiente, 250 g de suelo y en los nueve restantes se colocaron 250 g de cada uno de los compost. Tanto el suelo como el compost fueron previamente tamizados con un diámetro menor de 2 mm, utilizando un tamiz malla 10 ASTM. Posteriormente, el compost y el suelo fueron humedecidos con agua destilada hasta alcanzar una humedad óptima del 63% aproximadamente. La humedad de los compost se determinó empleando una balanza de humedad (PRECISA XM 50, Suiza) [14].

Se utilizaron semillas de maíz criollo, o nativas seleccionadas de la cosecha de un cultivo de maíz en el Resguardo de Rioblanco, municipio de Sotará, departamento del Cauca, Colombia. Se depositaron 3 semillas de maíz sobre discos de algodón de 5,7 cm de diámetro aproximadamente, los cuales fueron humedecidos con agua destilada. Se colocó el sistema de forma tal que no existiera contacto directo entre el disco y el sustrato, suelo o compost. Los recipientes se colocaron en un lugar seco y claro, a temperatura ambiente promedio de 19 °C (fotoperiodo de 14 horas luz y 10 horas oscuridad), por 7 días. Durante ese período se observó cómo ocurrió el proceso de germinación de las semillas de maíz en los sustratos. Pasados los 7 días de estudio, se calculó el porcentaje de germinación de las

semillas de maíz, empleando la ecuación 1, y visualmente, se observó si existía algún tipo de contaminación fitotóxica sobre las plántulas germinadas [2].

$$\%GE = \frac{S_C}{S_G} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

$\%GE$ es el porcentaje de germinación de las semillas de maíz nativas

S_C Número de semillas colocadas sobre los discos de algodón

S_G Número de semillas germinadas sobre los discos de algodón

2.2.2. Determinación y evaluación de la tolerancia de plantas de trigo al compost (Test de Barley)

Se utilizaron los tres sustratos descritos, previamente tamizados a un diámetro menor de 2 mm utilizando un tamiz ASTM E malla 10. Como testigo, se empleó el mismo suelo usado en la prueba de crecimiento.

Tanto el compost como el suelo fueron humedecidos con agua hasta alcanzar una humedad óptima de aproximadamente 63% (balanza de humedad PRECISA XM 50, Suiza). Los sustratos se colocaron en recipientes plásticos con cinco perforaciones en el fondo y una capacidad de 500 mL. Las semillas de trigo se sembraron depositando cinco semillas en cada recipiente. Los tratamientos se mantuvieron en un lugar seco y fresco, con una temperatura ambiente promedio de 14 a 19 °C. Diariamente se realizó el riego de las plantas utilizando una regadera IMUSA de 8 L. El rendimiento del compost se calculó mediante la ecuación 2. La altura de las plantas y la longitud de las raíces se midieron con un pie de rey digital Mitutoyo CD-6" CSX-B [15].

$$RM_{(r)} = \frac{RM_{compost}}{RM_{suelo}} \times 100 \quad (2)$$

$RM_{(r)}$ es el rendimiento del compost con relación al control

$RM_{compost}$ es el rendimiento de la masa fresca de las plántulas del compost

RM_{suelo} es el rendimiento de la masa fresca de las plántulas del suelo usado como control

2.2.3 Índice de clorofila

El índice de clorofila se estimó para cada una de las plántulas de trigo germinadas, sembradas en cada uno de los tipos de compost, tomando un total de 30 mediciones por cada tipo de compost. El índice de clorofila se estimó, empleando el medidor de clorofila (CCM200 Plus, Australia), el cual mide la concentración relativa de clorofila por medio de la luz transmitida a través de la hoja en una relación de la transmisión óptica obtenida a 931 nm y la transmisión óptica obtenida a 653 nm (longitud de onda fotosintéticamente activa)[16].

2.2.4. Prueba de producción de CO₂ por respirometría en sistema cerrado

Para el presente ensayo se pesaron por triplicado, en una balanza analítica 200 g de cada uno de los compost en base húmeda (63% aproximadamente). Los 200 g de cada compost se depositaron en nueve reactores de 500 mL, y se incubaron en un horno de

convección forzada (CENTRICOL, Colombia), a temperatura de $58\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, por un periodo de 48 h. aproximadamente. La producción de CO_2 fue medida por medio de un equipo respirómetro (MICRO-OXYMAX, USA) empleando un sensor de CO_2 con una sensibilidad de $0,2\text{ }\mu\text{L}$ por hora [7].

2.3 Estabilidad química

2.3.1 Estimación del contenido de carbono orgánico total (COT)

En la estimación del Carbono Orgánico Total (COT), los tres tipos de compost se secaron en un horno de convección forzada (MEMERT, Alemania) de 40 L, a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante aproximadamente dos horas. Los compost secos se procesaron en un molino analítico (KINEMATICA PX-MFC 90 D, Alemania), realizando moliendas sucesivas a 6.000 rpm, utilizando tamices de diámetros decrecientes: primero de 2 mm, luego de 1 mm y finalmente de 0,5 mm. Para ello, se pesaron, por triplicado, 0,5 g de cada uno de los compost secos y se colocaron en vasos de precipitados (beakers) de 100 mL.

A continuación, se agregaron 5 mL de una solución de dicromato de potasio 0,17 N. Los beakers se agitaron suavemente para homogenizar la mezcla y, después, se añadieron rápidamente 10 mL de ácido sulfúrico concentrado. La mezcla se agitó suavemente y se dejó reposar durante aproximadamente 30 minutos. Tras este tiempo, se adicionaron 50 mL de agua destilada a cada beaker, se mezclaron nuevamente y se dejaron en reposo durante aproximadamente 14 horas.

Pasadas las 14 horas, el sobrenadante de cada solución se transfirió a tubos de centrifuga de 50 mL, los cuales fueron centrifugados en una centrífuga HERMLE Z306 a 1.008 RCF durante cinco minutos. Posteriormente, el sobrenadante fue filtrado utilizando papel de celulosa WHATMAN grado 40 para obtener una solución libre de impurezas [7], [17].

Finalmente, las soluciones filtradas fueron diluidas a una proporción 1:2 con agua destilada, y se midieron mediante espectrofotometría a 588,9 nm (SHIMADZU UV-1800). La cuantificación del COT se realizó empleando la ecuación 3.

$$COT(\%) = \frac{Abs_{588,9} - 0,0199 \times FD}{0,0641 \times W_{muestra}} \quad (3)$$

Donde:

$COT(\%)$ es el contenido de carbono orgánico total

$Abs_{588,9}$ es la absorbancia mediada en le espectrofotómetro

FD es el factor de dilución empleado

$W_{muestra}$ es el peso de la muestra

0,0199 y 0,0641 son constantes

2.3.2 Estimación del contenido de nitrógeno

El contenido de nitrógeno total en los tres tipos de compost (Rejoja, Mamá Lombriz y Abonisa) se determinó mediante el método Kjeldahl, siguiendo procedimientos estándar. Las muestras de compost secas (<2 mm) se digirieron en matraces Kjeldahl utilizando ácido sulfúrico concentrado y una mezcla catalítica (sulfato de potasio y óxido de cobre),

aplicando una temperatura de 350-400 °C hasta obtener un extracto claro. Posteriormente, el nitrógeno amoniacal liberado se destiló con NaOH al 40% y se absorbió en ácido bórico al 4%, con indicador mixto (rojo de metilo/verde de bromocresol). La solución resultante se tituló con HCl 0.01 N para determinar el volumen consumido. El contenido de nitrógeno (%N) se calculó considerando el peso de la muestra, el volumen de ácido utilizado y la normalidad de la solución. Los análisis se realizaron por triplicado y se incluyeron controles en blanco para garantizar la precisión del procedimiento [18], [19].

2.3.3. Medición del pH

El pH se determinó de acuerdo con lo sugerido por la norma ISO 14855-1, para ello en beaker de 200 mL se preparó una solución de 1 parte de compost por 5 partes de agua destilada, empleado una plancha de agitación con un magneto, se agitó constantemente y se procedió a medir el pH empleado un medidor de pH (Lab 860, Alemania). El proceso se realizó por triplicado para cada tipo de compost.

2.3.4 Medición de los Sólidos Totales (SST) y Sólidos Volátiles (STV)

Para la determinación de los SST, se utilizaron nueve cajas de Petri (tres réplicas por cada tipo de compost), las cuales fueron secadas previamente a 105°C durante 30 minutos en un horno de convección forzada (Mettler, 40 L, Alemania) y pesadas en una balanza analítica (Precisa XB 220, Suiza). En cada caja de Petri, se depositaron 10 g de compost, distribuidos uniformemente. Las muestras se secaron a 105°C en el horno de convección hasta alcanzar un peso constante, y con base en esto, se calculó el porcentaje de SST.

Para la determinación de los STV, se emplearon nueve crisoles previamente secados a 105°C durante 30 minutos y pesados en la misma balanza analítica. Se tomaron 0,5 g de cada tipo de compost (por triplicado), y las muestras se incineraron en una mufla con un aumento progresivo de temperatura: primero a 250°C durante una hora, seguido de 450°C durante otra hora, y finalmente a 550°C durante dos horas. Este proceso permitió la incineración y liberación de compuestos volátiles sin formación de llamas. Una vez completado el tiempo de incineración, los crisoles se enfriaron en un desecador y se pesaron nuevamente. Con los valores obtenidos, se calculó el porcentaje de STV.

2.3.5 Análisis estructural de materiales compostados mediante espectroscopía FTIR para evaluar la biodegradación

La metodología para el análisis estructural de los materiales compostados mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) consistió en la evaluación de cambios en los grupos funcionales durante el proceso de biodegradación. Se empleó un espectrómetro FTIR (IRAFFINITY-1S, Shimadzu Corp., Kyoto, Japón) equipado con un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR) MIRacle 10 y cristal de diamante con un ángulo de incidencia de 45°. Las muestras fueron recolectadas en distintas etapas del compostaje, asegurando representatividad en cada punto del proceso. Estas se analizaron en un rango espectral de 4000-500 cm⁻¹, utilizando la técnica ATR con una resolución de 4 cm⁻¹ y un promedio de 100 escaneos por medición.

Cada muestra fue preparada cuidadosamente para garantizar un contacto íntimo con el cristal del equipo, evitando contaminación externa y sin control adicional de presión.

Antes de cada análisis, se realizó una calibración del espectrómetro mediante la obtención de un espectro de fondo en aire.

2.4 Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental unifactorial con tres niveles, completamente al azar. El factor, los niveles y las variables de respuesta se describen en la Tabla 1. En los ensayos de germinación y tolerancia de plántulas de trigo, se utilizó suelo como testigo. El análisis estadístico se realizó mediante un ANOVA con un nivel de confianza del 95%, utilizando el software SPSS Statistics V20. Para comparar las medias, se empleó el método de Tukey en caso de varianzas homogéneas, mientras que para varianzas no homogéneas se utilizó la prueba T3 de Dunnett.

Tabla 1. Diseño experimental aplicado en la determinación de la estabilidad de los compost.

Tabla 1Factor	Niveles	Variables de respuesta
Tipo de compost	Compos 1 (Rejoya)	Estabilidad biológica: Germinación (%), altura de las plántulas de trigo (mm), longitud de raíces de trigo (mm), índice de clorofila, producción de CO ₂ (mL).
	Compost 2 (Mamá Lombriz)	
	Compost 3 (Abonisa)	Estabilidad Química: Estimación del contenido de carbono orgánico (COT %), Nitrógeno (%), Sólidos totales (SST %), sólidos volátiles (STV %) y pH.

3. Resultados y discusión

3.1. Establecimiento de la pila de compost

El proceso de compostaje inició con el traslado de los residuos generados durante las pruebas de escalamiento tecnológico hacia la compostera de la finca La Rejoya. Este procedimiento contó con el apoyo del personal técnico del lugar, quienes emplearon prácticas estandarizadas para el manejo y preparación del material. En la Figura 1 se ilustra el traslado y disposición inicial de los residuos para su mezcla con otros componentes.

Los residuos recolectados incluyeron recortes de césped provenientes de diversas dependencias de la Universidad del Cauca, utilizados como fuente de nitrógeno; melaza comercial diluida, que sirvió como fuente de azúcares; y viruta de madera, empleada como reservorio de nitrógeno. Posteriormente, estos materiales se combinaron siguiendo un protocolo estructurado. El proceso dio como resultado una pila de compost con un diámetro aproximado de 6 metros y una altura de 3 metros (figura 1), configurada de

acuerdo con las normas establecidas por el personal encargado de la compostera finca la rejoya de la Universidad del Cauca.



Figura 1. compost estabilizado a partir de residuos generados durante el proceso de escalamiento.

3.2 Estabilidad biológica de tres tipos de compost

3.2.1 Test de crecimiento

En la Tabla 2 se presentan los resultados de la prueba de crecimiento, en el cual se observó que el compost proveniente de la finca La Rejoya de la Universidad del Cauca obtuvo el mayor porcentaje de germinación de semillas de maíz nativo, seguido por el compost de la granja integral Mamá Lombriz. Aunque no se encontraron diferencias significativas en los porcentajes de germinación entre los tres tipos de compost, con un valor de alfa de 0,055 (mayor a 0,050), se detectaron varianzas no homogéneas.

Por lo tanto, se aplicó la prueba T3 de Dunnett, que tampoco reveló diferencias entre los compost. No obstante, el compost de La Rejoya presentó el porcentaje de germinación más cercano al 100%, valor similar al obtenido por el suelo, que se utilizó como testigo.



Figura 2. Test de germinación de semillas de maíz nativas (a) compost proveniente de la finca la Rejoya (b) Compost comercial Abonisa (c) Compost proveniente de la granja integral Mamá Lombriz (d) Suelo usado como testigo.

Con relación a la altura de la planta, no se observaron diferencias estadísticamente significativas, puesto que la significancia fue del 0,641, mayor de 0,05. Mientras que, para la longitud de la raíz, sí mostró diferencias significativas, con un valor de significancia de 0,003, menor de 0,050, y varianzas homogéneas lo que implicó el uso de la prueba de Tukey. Esta prueba estableció 2 grupos: con un extremo mayor, el compost de la Rejoya con una longitud de la raíz de $55,00 \pm 4,00$ mm, y en el extremo menor, el compost comercial Abonisa, con una longitud de $15,00 \pm 2,00$ mm, ratificando al compost de la Rejoya con el máximo valor como el más idóneo para ser empleado como inóculo. En la Figura 2 se presenta la forma de germinación de las semillas, donde se observa que las raíces de la plántula detienen el crecimiento al contacto con el compost Abonisa.

Generalmente, una prueba de crecimiento se realiza con el fin de observar el grado de toxicidad que pueda tener el compost debido a su inestabilidad [1], [2]. Básicamente, si se encuentra que las plantas expuestas al compost y al suelo presentan potenciales de crecimiento similares, esto indica ausencia de fitotoxicidad, lo que implica que para dos de los tres tipos de compost se presentó una media fitotoxicidad. Tanto para Mamá Lombriz como Abonisa, estos valores estuvieron en un rango del 50% y 80%, con $80,00 \pm 6,00$ y $60,00 \pm 8,00$ respectivamente. Mientras que el compost de la Rejoya supera este límite, lo que indica un grado bajo o nulo de fitotoxicidad.

Tabla 2. Promedios del proceso de germinación de semillas de maíz nativo en discos de algodón sobre diferentes tipos de compost, a temperatura ambiente (19°C) y fotoperíodo de 14 h luz/10 h oscuridad, durante 7 días.

Tipo de sustrato	Germinación (%)	Altura de la planta (mm)	Longitud de la raíz (mm)
Compost Rejoya	85,00 ± 5,00*	45,00 ± 3,00*	55,00 ± 4,00*
Compost Abonisa	60,00 ± 8,00*	42,00 ± 2,50*	15,00 ± 2,00*
Compost Mamá Lombriz	80,00 ± 6,00*	38,00 ± 4,00*	30,00 ± 3,00*
Suelo	100,00 ± 0,00	40,00 ± 2,50	50,00 ± 2,50

Notas:

1. Los datos están expresados como promedio ± desviación estándar.
2. Los valores marcados con un asterisco (*) indican diferencias significativas ($P < 0.05$) respecto al control ("Suelo").
- 3.

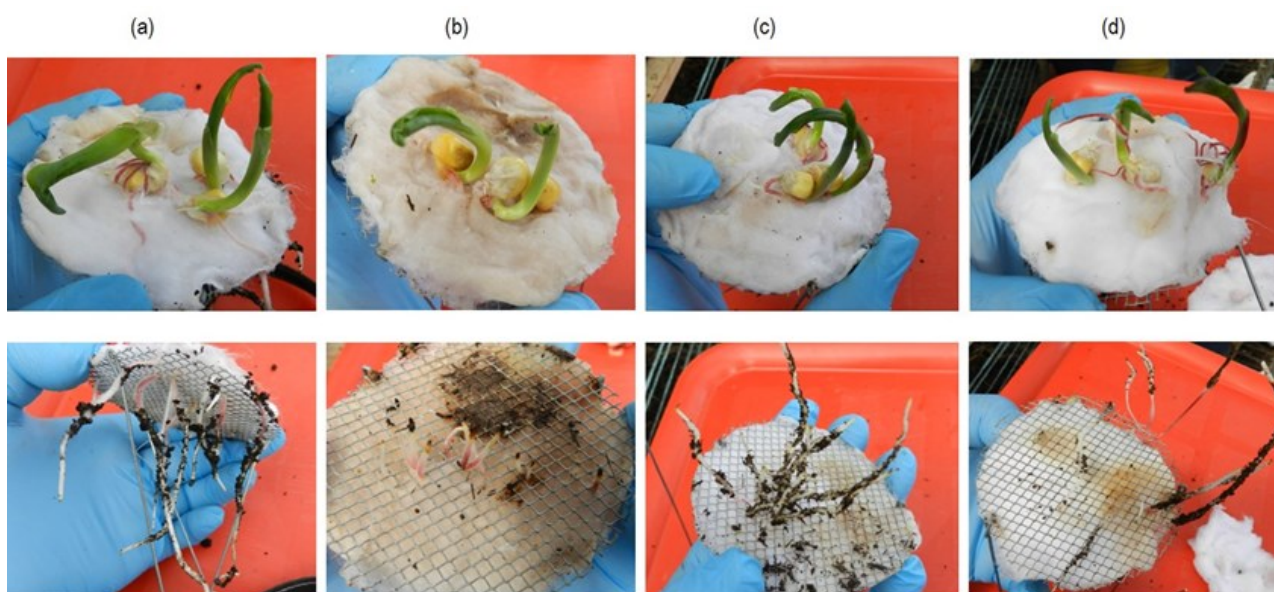


Figura 3. Crecimiento de las plántulas de maíz (a) compost proveniente de la finca la Rejoya (b) Compost comercial Abonisa (c) Compost proveniente de la granja integral Mamá Lombriz (d) Suelo usado como referente.

La ausencia de crecimiento de raíces (ver Figura 3b) sugiere la presencia de sustancias inhibitoras en el sustrato. Estas sustancias son el resultado, principalmente, de los procesos de nitrificación y desnitrificación de la materia orgánica. Como consecuencia, el sustrato Abonisa resulta inadecuado para su uso como inóculo en pruebas de biodegradación de materiales plásticos realizadas bajo condiciones controladas de compostaje [7].

3.3 Tolerancia de plantas de trigo al compost Test de Barley

Las semillas de trigo mostraron una mayor tolerancia al compost proveniente de la finca La Rejoya, que presentó un rendimiento total de $95,74\% \pm 1,08$, seguido por el compost de la granja integral Mamá Lombriz, con un rendimiento total de $84,19\% \pm 10,15$. En esta variable, se identificaron diferencias estadísticamente significativas con respecto al compost comercial Abonisa, cuyo rendimiento total fue de $15,39\% \pm 2,48$, un valor considerablemente bajo. Esto resulta relevante, ya que en pruebas de este tipo se espera que el rendimiento del sistema radicular y foliar supere el 90%. Alcanzar o superar este porcentaje garantiza que el compost puede ser utilizado de forma segura en diversas aplicaciones. Por lo tanto, entre los compost evaluados, el elaborado en la finca La Rejoya se posiciona como el más confiable para ser empleado como inóculo en pruebas de biodegradación aerobia bajo condiciones controladas de compostaje. La tabla 3 presenta un resumen de los datos obtenidos en la prueba de Barley [20], [21].

Tabla 3. Rendimientos promedio obtenidos en la prueba de Barley de las semillas de trigo germinadas en cada uno de los tres tipos de compost.

Procedencia compost	Rendimiento mezcla (g)	Rendimiento suelo (g)	Rendimiento total (%)
Rejoya	0,4231±0,0184	0,4420±0,0233	95,74±1,08
Abonisa	0,0681±0,0127	0,4420±0,0233	15,39±2,48
Mamá Lombriz	0,3727±0,0563	0,4420±0,0233	84,19±10,15
Suelo	0,4420±0,0233	0,4420±0,0233	100

3.4. Producción de CO₂ por respirometría en sistema cerrado

En la figura 4 se presentan las cinéticas de producción de CO₂ de los tres diferentes compost, después de 1 hora de proceso se puede observar como el compost proveniente de la granja integral Mamá Lombriz genera la mayor la producción de CO₂ llegando a 105,7 mL en 3 horas aproximadamente, lo que no ocurre con el compost de la finca la Rejoya y el compost comercial Abonisa, los cuales generaron 32,9 mL y 20,2 mL de CO₂ respectivamente, en el mismo periodo de tiempo. Este comportamiento se mantiene en el transcurso de todo el proceso, no obstante, después de aproximadamente 15 horas de ensayo el compost Abonisa supera en producción de CO₂ con 174,9 mL, al compost de la Rejoya quién genero 146,1 mL de CO₂, en el mismo periodo de tiempo, tendencia que se mantuvo hasta las 46 horas de estudio del proceso de producción de CO₂ de los tres tipos de compost.

Se observaron diferencias significativas en la producción de CO₂ entre los compost. El compost proveniente de la granja integral Mamá Lombriz después de 48 horas de estudio, generó la mayor cantidad de CO₂ (419,53mL±78,59), a medida que transcurrió el tiempo la cantidad de producción CO₂ se redujo y llegó a una fase estacionaria indicando el grado de estabilidad del compost. La medición de la generación de CO₂ es la técnica más directa para establecer la estabilidad de un compost, puesto que está relacionado directamente con la respiración y la actividad biológica [2], [3], [7]. La producción de CO₂ de un compost estable debe ser menor de 800 mL en 48 horas, es decir, que entre más pequeña sea la generación de CO₂ más estable se considera el compost, y quien cumplió con esta característica fue el compost proveniente de la finca la Rejoya, registrando una producción promedio de CO₂ de 150,26mL±20,78, ratificando la viabilidad de este producto para su uso como inoculo en la prueba de biodegradación [13].

Un menor CO₂ acumulado en el compost indica una mayor estabilidad biológica y una menor tasa de mineralización de la materia orgánica, lo que sugiere que el compost está más maduro y estabilizado (ver figura 4). Esto es beneficioso porque reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, conserva más carbono en forma de materia orgánica humificada, mejora la calidad del compost y su capacidad de mejorar el suelo a largo plazo [4], [8]. Además, implica una menor pérdida de nutrientes esenciales, lo que favorece la fertilidad del suelo. En la figura 4, el compost comercial muestra la mayor acumulación de CO₂, lo que indica una descomposición más rápida y posiblemente menor estabilidad, mientras que el compost rejoya presenta la menor acumulación, sugiriendo una mejor retención de carbono y mayor estabilidad, lo que lo hace más favorable para su aplicación agrícola [22], [23].

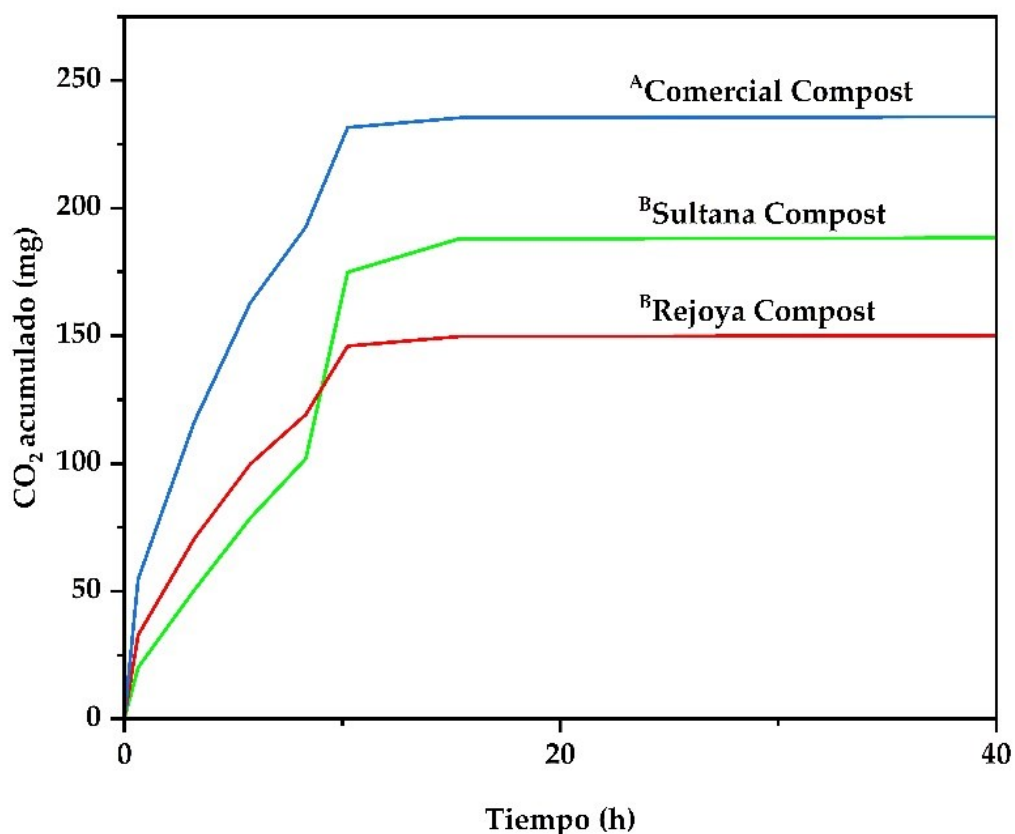


Figura 4. ^ACantidad de CO₂ generado por el compost comercial Abonisa ^BCantidad de CO₂ generado por el compost proveniente de la granja integral Mamá Lombriz ^CCantidad de CO₂ generado por el compost proveniente de la finca la Rejoya.

3.5. Índice de clorofila

No se presentaron diferencias significativas en la producción de clorofila de las plántulas de trigo, crecidas en los diferentes compost. Sin embargo, se destaca el compost proveniente de la finca la Rejoya con un índice promedio de $1,83 \pm 0,60$, le siguen el compost proveniente de la granja integral Mamá Lombriz y el compost comercial Abonisa con un índice de $1,56 \pm 0,55$, y $1,46 \pm 0,36$, respectivamente. Hoy en día, la estimación de la intensidad del color verde de las hojas es una técnica bastante empleada en la evaluación del contenido de nitrógeno en una planta puesto que existe una correlación directa entre la intensidad del verde y el contenido de clorofila con la concentración de nitrógeno en la hoja, debido a que el nitrógeno es un indicador del normal crecimiento de las plantas. Los resultados de la prueba ratifican la óptima calidad del compost de la Rejoya para su uso en la prueba de biodegradación aerobia bajo condiciones controladas de compostaje [18], [19].

3.6. Estabilidad química de los tres tipos de compost

En la tabla 4 se presenta los datos promedios de las propiedades de los tres tipos de compost, se pueden observar el COT, el contenido de nitrógeno, SST, SSV, pH y la relación C/N. Estadísticamente se observaron diferencias entre los compost evaluados, es importante resaltar la relación C/N, del compost de la Rejoya. La relación C/N obtenida en el compost La Rejoya fue el más viable, debido a que en la norma ISO 14855-1, para el uso del compost como inóculo, en la prueba de biodegradación, se establece un rango de relación C/N entre 10 y 40, debido a que este rango asegura la buena calidad del compost

e idoneidad para ser empleado como inóculo. Otro de los de los compost con una aceptable relación C/N fue el elaborado en la granja integral Mamá Lombriz, sin embargo, entre mayor sea esta relación se incrementa la calidad del compost. El compost comercial Abonisa presentó una relación C/N baja, indicando que definitivamente la calidad de este tipo de compost no le permite ser empleado en el desarrollo de una prueba de biodegradación [22], [23].

Además de la relación C/N, el compost de la finca Rejoya se destaca en los contenidos de SST, STV, pH, valor de pH (7,1) que se encuentra dentro del rango sugerido por la norma ISO 14855-1 que indica que el pH debe estar entre 7 y 9. Contrario ocurre con el compost comercial Abonisa, con valor de pH que supera el rango permitido, lo que se traduce en la no viabilidad del uso de un compost comercial como inóculo [21], [22].

Tabla 4. Datos promedios obtenidos en el proceso de medición de las propiedades químicas de las tres diferentes procedencias de compost.

Procedencia compost	COT (%)	Nitrógeno (%)	SST (%)	STV (%)	pH	C/N
Rejoya	11,66±0,18	0,87±0,04	45,35±0,55	62,01±0,38	7,11±0,03	13,36±0,46
Abonisa	7,41±0,68	1,45±0,11	36,14±0,20	48,15±0,14	10,10±0,06	5,13±0,76
Mamá Lombriz	10,75±0,15	0,94±0,04	32,43±0,42	51,22±0,66	7,65±0,12	11,49±0,65

3.7 Seguimiento de la pila de compost

Los espectros de FTIR muestran modificaciones estructurales en el material a lo largo del proceso de compostaje. Se observan cambios en las bandas dentro del rango de 3200 cm⁻¹ a 3500 cm⁻¹, correspondientes a los grupos hidroxilo (O-H). Estas variaciones están asociadas a los enlaces inter e intramoleculares de los grupos hidroxilo y su contenido de agua [24], [25]. En particular, se identifican desplazamientos en la banda de absorción desde 3338 cm⁻¹ hasta aproximadamente 3336 cm⁻¹, lo que sugiere alteraciones en los estiramientos de los enlaces O-H [26], [27].

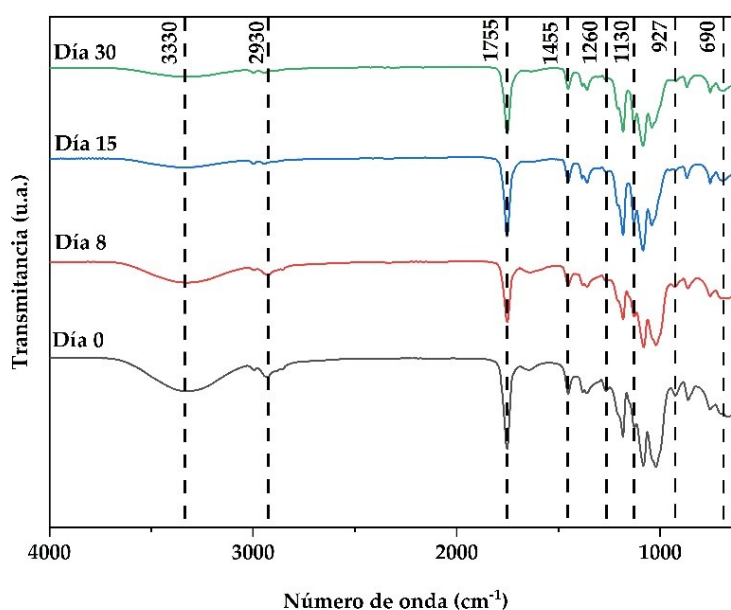


Figura 5. Cambios estructurales por FTIR del material sometido a una prueba de compostaje a escala piloto.

Además, la intensificación de algunas bandas de absorción y la aparición de nuevas señales en los espectros indican modificaciones estructurales en el material. Específicamente, las bandas en 3320 cm^{-1} , 2940 cm^{-1} y 1640 cm^{-1} están relacionadas con los estiramientos de los grupos O-H (hidroxilos), C-H y O-H del agua absorbida, respectivamente (ver figura 5). La banda en 1423 cm^{-1} se asocia con los modos de flexión de los enlaces H-C-H y O-C-H, los cuales muestran cambios en su intensidad a lo largo del proceso de biodegradación [28], [29].

En el rango de 1160 cm^{-1} a 1290 cm^{-1} (ver figura 5), se identifica la presencia de estiramientos del enlace C-O, mientras que las bandas en 1030 cm^{-1} y 1014 cm^{-1} presentan una disminución en su intensidad, lo que sugiere degradación del material debido a la actividad microbiana [25], [30]. Por otro lado, las señales en el intervalo de 796 cm^{-1} a 769 cm^{-1} corresponden a las vibraciones del anillo C-O-C de los componentes poliméricos del material, evidenciando cambios estructurales [24].

En general, las modificaciones observadas en los espectros FTIR reflejan la acción del proceso de compostabilidad sobre el material. La variación en la posición e intensidad de los picos de absorción de los grupos funcionales indica un deterioro progresivo de la estructura química, sugiriendo la degradación del material bajo las condiciones de compostaje [26], [27].

5. Conclusiones

Los resultados del estudio confirman que el compost de la Finca La Rejoya es el más adecuado como inóculo para pruebas de biodegradación aerobia. Este compost destaca por su estabilidad biológica y química, presentando una relación carbono/nitrógeno de 13,36, un pH de 7,11, y una producción de CO_2 significativamente menor (150,26 mL en 48 horas), lo que evidencia un proceso de mineralización más controlado y una madurez avanzada.

A pesar de ser un compost comercial, el producto Abonisa mostró deficiencias significativas. Su bajo índice de germinación (60%) y una longitud de raíz mínima (15 mm) indican la presencia de compuestos inhibidores. Además, su relación C/N baja (5,13) y un pH elevado (10,10) lo hacen inadecuado para aplicaciones que requieren un compost de alta estabilidad.

El compost de la Granja Mamá Lombriz presenta características aceptables, con una relación C/N de 11,49 y un rendimiento en pruebas biológicas que, aunque no óptimo, lo posiciona como una opción intermedia. Sin embargo, su mayor generación de CO_2 (419,53 mL en 48 horas) indica una menor estabilidad comparada con el compost de la Finca La Rejoya.

La evaluación integral de parámetros biológicos (como germinación, índice de clorofila y tolerancia de plántulas) y químicos (C/N, SST, STV, pH) es crucial para garantizar la idoneidad del compost como inóculo en pruebas de biodegradación. Los resultados refuerzan la necesidad de establecer estándares más rigurosos para compost comerciales, dado su variabilidad en calidad.

Este estudio resalta cómo el compostaje, particularmente con materiales orgánicos bien manejados, puede contribuir a la sostenibilidad ambiental. La utilización del compost como inóculo en pruebas de biodegradación ofrece una solución práctica y eficiente para la gestión de residuos plásticos biodegradables.

Fondos: Esta investigación fue financiada por el proyecto de Jóvenes Investigadores e Innovadores en el Departamento del Cauca BPIN 2020000100043 con ID 5645.

Agradecimientos: Los autores agradecen al grupo de investigación de Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial (CYTBIA), al Ministerio de Ciencia, Tecnología e innovación, JOVEN INVESTIGA, la Universidad del Cauca y la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca.

Referencias

- [1] M. K. Manu, R. Kumar, and A. Garg, "Effect of Microbial Inoculum and Leachate Circulation on the Performance of Rotary Drum Composter Used for Household Wet Biodegradable Waste," *Waste Biomass Valorization*, vol. 12, no. 11, pp. 6119–6137, Nov. 2021, doi: 10.1007/s12649-021-01430-0.
- [2] G. Dolci, M. Intiliano, F. Fava, V. Venturelli, F. Malpei, and M. Grosso, "Degradation of paper-based boxes for food delivery in composting and anaerobic digestion tests," *Bioresour Technol*, vol. 408, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.biortech.2024.131212.
- [3] H. Li *et al.*, "Effect of microbial inoculum on composting efficiency in the composting process of spent mushroom substrate and chicken manure," *J Environ Manage*, vol. 353, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120145.
- [4] K. Zhao *et al.*, "Optimizing the management of aerobic composting for antibiotic resistance genes elimination: A review of future strategy for livestock manure resource utilization," Nov. 01, 2024, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122766.
- [5] M. Wu *et al.*, "Deciphering the driving mechanism of microbial community for rapid stabilization and lignocellulose degradation during waste semi-aerobic bioreactor landfilling with multifunctional microbial inoculum," *Waste Management*, vol. 194, pp. 88–103, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.wasman.2025.01.007.
- [6] R. Altieri, M. Seggiani, A. Esposito, P. Cinelli, and V. Stanzione, "Thermoplastic Blends Based on Poly(Butylene Succinate-co-Adipate) and Different Collagen Hydrolysates from Tanning Industry —II: Aerobic Biodegradation in Composting Medium," *J Polym Environ*, vol. 29, no. 10, pp. 3375–3388, Oct. 2021, doi: 10.1007/s10924-021-02124-3.
- [7] J. J. Palechor-Tróchez, H. S. V. Castillo, L. Serna-Cock, and J. F. S. Duque, "Thermal and structural changes of a starch flexible film and cellulosic semi-rigid tray during the biodegradation process under controlled composting conditions," *Int J Biol Macromol*, vol. 279, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.134595.
- [8] Y. Luo, J. Shen, X. Wang, H. Xiao, A. Z. Yaser, and J. Fu, "Recent advances in research on microbial community in the composting process," Oct. 01, 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s13399-023-04616-9.
- [9] A. D. Tripathi, K. Khosravi Darani, D. C. Rai, and V. Paul, *Biodegradable Polymer-Based Food Packaging*. Springer Nature, 2022. doi: 10.1007/978-981-19-5743-7.
- [10] D. P. Sethy and S. Sahoo, "A comprehensive review on different leaf fiber loading on PLA polymer matrix composite," 2024, *SAGE Publications Ltd*. doi: 10.1177/08927057241268832.
- [11] J. Barbir *et al.*, "Assessing ecotoxicity of an innovative bio-based mulch film: a multi-environmental and multi-bioassay approach," *Front Environ Sci*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/fenvs.2023.1171261.
- [12] I. Heisterkamp, M. Ratte, U. Schoknecht, S. Gartiser, U. Kalbe, and O. Ilvonen, "Ecotoxicological evaluation of construction products: inter-laboratory test with DSLT and percolation test eluates in an aquatic biotest battery," *Environ Sci Eur*, vol. 33, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s12302-021-00514-x.
- [13] F. Núñez, M. Pérez, L. F. Leon-Fernández, J. L. García-Morales, and F. J. Fernández-Morales, "Effect of the mixing ratio on the composting of OFMSW digestate: assessment of compost quality," *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 24, no. 5, pp. 1818–1831, Sep. 2022, doi: 10.1007/s10163-022-01438-1.
- [14] M. J. Tahsini, M. Nikaeen, and A. H. Nafez, "Biological treatment of compost leachate: Assessing the efficacy of composting process and bioaugmentation of composting piles," *Environ Technol Innov*, vol. 36, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.eti.2024.103859.
- [15] E. Ghouili *et al.*, "Date palm waste compost promotes plant growth and nutrient transporter genes expression in barley (*Hordeum vulgare* L.)," *South African Journal of Botany*, vol. 149, pp. 247–257, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.sajb.2022.06.018.
- [16] L. D. Phung, S. Sao, S. D. Afriani, A. Kumar, and T. Watanabe, "ZnO nanoparticles in composted sewage sludge enhance soil fertility and rice nutrition but elevate As and Pb accumulation," *J Environ Chem Eng*, vol. 12, no. 5, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.jece.2024.113606.
- [17] S. Asante-Okyerere, S. A. Marfo, and Y. Y. Ziggah, "Estimating total organic carbon (TOC) of shale rocks from their mineral composition using stacking generalization approach of machine learning," *Upstream Oil and Gas Technology*, vol. 11, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.upstre.2023.100089.

- [18] A. Pudielko and M. Chodak, "Estimation of total nitrogen and organic carbon contents in mine soils with NIR reflectance spectroscopy and various chemometric methods," *Geoderma*, vol. 368, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114306.
- [19] M. Schlemmera *et al.*, "Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 25, no. 1, pp. 47–54, 2013, doi: 10.1016/j.jag.2013.04.003.
- [20] F. Rasouli *et al.*, "One size does not fit all: Different strategies employed by triticale and barley plants to deal with soil salinity," *Environ Exp Bot*, vol. 218, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.envexpbot.2023.105585.
- [21] L. Salis, A. Cabiddu, F. Sanna, M. Sitzia, and G. Carboni, "Municipal solid waste compost use can improve crop barley production and enhance soil chemical fertility," *European Journal of Agronomy*, vol. 153, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.eja.2023.127064.
- [22] D. Baskaran and R. Rajamanickam, "Aerobic biodegradation of trichloroethylene by consortium microorganism from turkey litter compost," *J Environ Chem Eng*, vol. 7, no. 4, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103260.
- [23] K. E. Anyaoha, R. Maletz, A. Rückert, and C. Dornack, "Potentials for microalgae sequestration of carbon dioxide (CO₂) from composting off-gas; a review," Oct. 01, 2024, *Elsevier Inc.* doi: 10.1016/j.rcradv.2024.200213.
- [24] M. Yang *et al.*, "New insight into the spatio-temporal patterns of functional groups of hotspot inside the composting aggregates by synchrotron-based FTIR in hyperthermophilic composting," *Science of the Total Environment*, vol. 945, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.174139.
- [25] W. Yang, Y. Zhong, Q. Zhuo, L. Xiao, G. Owens, and Z. Chen, "Enhanced copper passivation in pig manure composting through iron nanoparticle amendment," *Science of the Total Environment*, vol. 958, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.177950.
- [26] E. Gastaldi, F. Buendia, P. Greuet, and S. Domenech, "Data on behavior and environmental impact of compostable packaging materials in full-scale industrial composting conditions," *Data Brief*, vol. 57, p. 111102, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.dib.2024.111102.
- [27] F. Ruggero, E. Carretti, R. Gori, T. Lotti, and C. Lubello, "Monitoring of degradation of starch-based biopolymer film under different composting conditions, using TGA, FTIR and SEM analysis.," *Chemosphere*, vol. 246, May 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125770.
- [28] R. R. Hurley, A. L. Lusher, M. Olsen, and L. Nizzetto, "Validation of a Method for Extracting Microplastics from Complex, Organic-Rich, Environmental Matrices," *Environ Sci Technol*, vol. 52, no. 13, pp. 7409–7417, Jul. 2018, doi: 10.1021/acs.est.8b01517.
- [29] E. Niedrite, L. Klavins, L. Dobkevica, O. Purmalis, G. Ievinsh, and M. Klavins, "Sustainable control of invasive plants: Compost production, quality and effects on wheat germination," *J Environ Manage*, vol. 371, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.123149.
- [30] B. Shen *et al.*, "Insights from meta-analysis on carbon to nitrogen ratios in aerobic composting of agricultural residues," *Bioresour Technol*, vol. 413, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.biortech.2024.131416.