

Efecto de la adición de un inóculo bacteriano sobre el proceso y la calidad del producto
del co-compostaje de residuos verdes y de residuos de alimentos

Ludwing Fernando Joya Rangel y Juan Daniel Ojeda Barón

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ing. MSc. PhD

Codirectores

Viviana Sánchez Torres

Ing. PhD

Jonathan Soto Paz

Ing. PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicomecánicas

Escuela de ingeniería civil

Bucaramanga

2022

Tabla de contenido

Introducción	8
1. Objetivos	11
1.1. Objetivo general.....	11
1.2. Objetivos específicos	11
2. Marco teórico.....	11
2.1. Residuos verdes (RV)	11
2.2. Residuos de alimentos.....	11
2.3. Compostaje	12
2.3.1. <i>Compostaje de residuos verdes y su mejoramiento con la adición de otros cosustratos</i> <i>13</i>	
2.4. Parámetros operativos y de calidad.....	13
2.5. Inóculos bacterianos.....	14
2.6. Estado del arte.....	15
3. Metodología	18
3.1. Fase 1: Efecto de la incorporación de un inóculo bacteriano compuesto sobre la eficiencia del proceso	18
3.1.1. <i>Caracterización del sustrato</i>	18
3.1.2. <i>Montaje experimental</i>	19
3.1.3. <i>Efecto del inóculo sobre la eficiencia del proceso</i>	21
3.2. Fase 2: Influencia del inóculo bacteriano sobre parámetros de calidad del producto final 21	
3.2.1. <i>Influencia del inóculo sobre la calidad del producto</i>	21

3.2.2.	<i>Análisis estadístico</i>	22
4.	Análisis de resultados	22
4.1.	Fase 1: Efecto de la incorporación de un inóculo bacteriano compuesto sobre la eficiencia del proceso.	22
4.1.1.	<i>Monitoreo del proceso</i>	22
4.1.2.	<i>Efecto del inóculo sobre la eficiencia del proceso</i>	35
4.2.	Fase 2: Influencia del inóculo bacteriano sobre parámetros de calidad del producto final 36	
5.	Conclusiones	38
6.	Recomendaciones	38
	Referencias Bibliográficas	39

Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros operativos y de calidad.....	14
Tabla 2. Inóculos microbianos utilizados en el compostaje de residuos	16
Tabla 3. Parámetros registrados en productos de compostaje	17
Tabla 4. Resumen proceso de compostaje	24
Tabla 5. Calidad de los productos finales por parámetros	36

Lista de figuras

Figura 1. Perfiles de humedad de los tratamientos.....	23
Figura 2. Perfiles de temperatura de los tratamientos.....	24
Figura 3. Perfiles de pH de los tratamientos.....	26
Figura 4. Perfiles de CE de los tratamientos.....	27
Figura 5. Perfiles de COT de los tratamientos.....	29
Figura 6. Perfiles de NT de los tratamientos.....	30
Figura 7. Perfiles de C/N de los tratamientos.....	31
Figura 8. Perfiles de Contenido de lignocelulosa de los tratamientos.....	33
Figura 9. Perfiles de IG de los tratamientos.....	34

Resumen

Título: Efecto de la adición de un inóculo bacteriano sobre el proceso y la calidad del producto del co-compostaje de residuos verdes y de residuos de alimentos

Autores: Ludwing Fernando Joya Rangel y Juan Daniel Ojeda Barón

Palabras Clave: Co-compostaje, residuos verdes, residuos de alimentos, inóculo, enfriamiento

El compostaje de residuos verdes (RV) como solución a su manejo se desarrolla de forma lenta debido a la presencia de sustancias lignocelulósicas que entorpecen su degradación. El objetivo de este estudio es analizar el efecto que tiene la adición de un inóculo bacteriano compuesto, conformado por *Paenibacillus* sp. y *Bacillus* sp., en la eficiencia del proceso y la calidad del producto final del co-compostaje de RV y otros cosustratos. Esta adición se efectuó a los 21 días en la etapa de enfriamiento, obteniendo una reducción del tiempo del proceso en 4 días y una diferencia en la degradación de lignocelulosa de 6.8% comparándolo con el tratamiento de control. En cuanto a la calidad del producto no hubo mayor diferencia entre los tratamientos, obteniendo resultados que cumplen con la norma técnica colombiana para su uso en agricultura de acuerdo con los parámetros pH, carbono orgánico total, nitrógeno total, conductividad eléctrica, índice de germinación, relación C/N y prueba de autocalentamiento.

Abstract

Title: Effect of the addition of a bacterial inoculum on the process and product quality of co-composting of green waste and food waste.

Authors: Ludwing Fernando Joya Rangel y Juan Daniel Ojeda Barón

Key Words: Co-composting, green waste, food waste, inoculum, cooling

The composting of green waste (GW) as a solution to its management develops slowly due to the presence of lignocellulosic substances that hinder its degradation. The objective of this study is to analyze the effect of the addition of a composite bacterial inoculum, consisting of *Paenibacillus* sp. and *Bacillus* sp. on the efficiency of the process and the quality of the final product of co-composting of GW and other co-substrates. This addition was carried out after 21 days in the cooling stage, obtaining a reduction of the process time by 4 days and a difference in lignocellulose degradation of 6.8% compared to the control treatment. As for the quality of the product, there was no major difference between the treatments, obtaining results that comply with the Colombian technical standard for use in agriculture according to the parameters pH, total organic carbon, total nitrogen, electrical conductivity, germination index, C/N ratio and self-heating test.

Introducción

Los residuos verdes (RV) y residuos de alimentos (RA) representan la fracción predominante (mayor al 50%) de los residuos sólidos urbanos (RSU) en países en desarrollo (Hernández-Gómez et al., 2020). Los RV usualmente están compuestos por madera, poda de árboles y arbustos jóvenes, hojas muertas y verdes, recortes de césped y tierra; generados de parques municipales, jardines, reservas y viviendas domésticas (Oviedo-ocaña et al., 2021). La cantidad de RV es variable y depende del lugar geográfico. En particular, en el año 2013 en Estados Unidos, los RV constituyeron el 13.45% de los RSU, por otro lado en Taiwán estos llegan a representar entre el 22% y el 30% de los RSU (Oviedo-Ocaña et al., 2019).

La principal gestión de los RV en países en desarrollo es la disposición final (Cardona Castelblanco & Hernández Rios, 2008), por lo que el compostaje surge como una alternativa en el marco de la economía circular que permite obtener un producto final de valor agregado. No obstante, el compostaje de RV es difícil de realizar debido al contenido relativamente alto de sustancias lignocelulósicas (alrededor del 75% de su composición) que son resistentes a la degradación por vía microbiana, prolongando la duración del proceso, pudiendo tardar hasta 24 meses en madurar el producto final si no se utilizan estrategias para acelerar el proceso (Reyes-Torres et al., 2018). Esto tiene consecuencias al requerir de mayor área para realizar el proceso y afectaciones en la calidad del producto final (Oviedo-ocaña et al., 2021).

En los últimos 20 años la optimización del compostaje de RV se ha destacado como un tema de interés, por lo que se han realizado un número creciente de estudios (Reyes-Torres et al., 2018), los cuales obtuvieron resultados prometedores en la reducción del tiempo de proceso, disminución de emisiones gaseosas y mejora en la calidad del producto final (Reyes-Torres et al.,

2018). Algunas estrategias son: co-compostaje en dos etapas modificado con roca fosfórica y aserrín (Oviedo-ocaña et al., 2021), co-compostaje de RV con residuos de alimentos procesados y sin procesar (Oviedo-Ocaña et al., 2019) y la adición de inóculos microbianos compuestos (Yu et al., 2018) (Cariello et al., 2007). Con el fin de obtener valores de referencia para este estudio, se realizó una revisión bibliográfica, destacando la degradación de lignocelulosa de 25.47% en (Yu et al., 2018) con RV y otros más como (Cariello et al., 2007), (Manu et al., 2017) y (Abdel-Rahman et al., 2016) quienes evaluaron el efecto positivo que tuvo la inoculación en cuanto a los parámetros de calidad.

Pese a que se han elaborado diversos estudios sobre el co-compostaje de RV con RA, en Colombia no se ha realizado la aplicación de inóculos compuestos bacterianos y evaluado su eficacia en este proceso ni en la calidad del producto. Por lo que el grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) y el Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA), realizaron estudios donde aislaron cepas bacterianas presentes en el co-compostaje de RV con RA (Angarita Rangel & Rodríguez Flórez, 2018) y determinaron condiciones operativas (compostaje en una etapa y la incorporación de roca fosfórica) que mejoran el proceso como la configuración operacional (Hernández-Gómez, 2020). Por tanto, en este trabajo de grado se evaluó el proceso de co-compostaje de RV con RA con la incorporación de un inóculo bacteriano compuesto conformado por *Paenibacillus sp.* y *Bacillus sp.* preparado en el marco de un proyecto de investigación; dicha evaluación se efectuó en pilas cónicas de 120 kg, en los cuales se determinó su efecto tanto en las condiciones del proceso como en la calidad del producto final.

En este estudio, la adición del inóculo bacteriano compuesto sirve como estrategia para impulsar la implementación del co-compostaje de RV con RA, contribuyendo a la solución del

problema de su disposición final, causando una reducción en la ocupación de vertederos y el retorno de nutrientes y materia al suelo. En búsqueda de opciones para mejorar los procesos de transformación, esta estrategia cumple un papel fundamental en la reducción de los tiempos, optimizando y mejorando el rendimiento, lo que contribuye al desarrollo de esta tecnología para el manejo de los RSU.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Analizar el efecto de la adición de un inóculo bacteriano compuesto sobre el proceso y la calidad del producto final del co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos.

1.2. Objetivos específicos

Evaluar la incorporación de un inóculo bacteriano compuesto sobre la eficiencia del proceso del co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos.

Determinar la influencia del inóculo bacteriano sobre parámetros de calidad del producto final en el co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos.

2. Marco teórico

2.1. Residuos verdes (RV)

Los RV son materias de tipo lignocelulósico como poda, hojas secas y ramas, que se generan como resultado del cultivo y mantenimiento de jardines, parques, espacios públicos (veredas), así como también por la conservación de paisajes (Cardona Castelblanco & Hernández Rios, 2008).

2.2. Residuos de alimentos (RA)

Los RA son todos aquellos alimentos que no fueron consumidos y son descartados por quien los genera. Estos se pueden clasificar en procesados y sin procesar, siendo los procesados

aquellos que pasan por una serie de operaciones de cocción; por otro lado, los alimentos no procesados se definen como partes de plantas (semillas, hojas, raíces, frutas, cascaras) o animales (carne, leche) (Monteiro & Cannon, 2012).

2.3. Compostaje

El compostaje es un proceso que implica la descomposición biológica aeróbica de la materia orgánica y su estabilización por parte de microorganismos (Sánchez Díaz, 2009). El material después del proceso de degradación dependiendo de sus características fisicoquímicas y biológicas es conocido como compost y puede ser aplicado al suelo de forma beneficiosa (Agència de Residus de Catalunya, 2004)(Alcaldía Mayor de Bogotá & Universidad Nacional de Colombia, n.d.). El proceso se desarrolla en cuatro fases:

- **Mesofílica**

Esta fase puede durar entre uno y ocho días dependiendo del tipo de material de partida hasta alcanzar los 45°C. El incremento de temperatura se debe a que los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de carbono y nitrógeno generando calor. Cuando las temperaturas llegan a un valor cercano a los 40°C, los mesófilos mueren o quedan en estado latente, esperando a que las condiciones se reviertan, y comienza la siguiente fase (Sánchez Díaz, 2009).

- **Termofílica**

Se presenta cuando la temperatura supera los 45°C; esta fase puede durar desde días hasta meses según el material de partida, las condiciones climáticas y otros factores. En esta fase predominan bacterias filamentosas (actinomicetos) y hongos que actúan facilitan la degradación de fuentes más complejas de carbono, como la celulosa y la lignina (Alcaldía Mayor de Bogotá & Universidad Nacional de Colombia, n.d.).

- **Enfriamiento**

La fase de enfriamiento se presenta cuando las temperaturas se sitúan aproximadamente a 45°C o inferiores donde retoman la actividad metabólica los microorganismos mesófilos (Cardona Castelblanco & Hernández Rios, 2008) y el pH del medio desciende levemente, aunque en general el pH se mantiene ligeramente alcalino (Román et al., 2013).

- **Maduración**

En esta etapa la temperatura desciende hasta alcanzar valores cercanos a la temperatura ambiente. Los organismos mesofílicos continúan con el proceso de descomposición de la lignina, la celulosa y la humificación de la materia orgánica. En este punto se dice que el material se encuentra estable biológicamente y se da por culminado el proceso (Cardona Castelblanco & Hernández Rios, 2008).

2.3.1. Compostaje de residuos verdes y su mejoramiento con la adición de otros cosustratos

El compostaje de residuos verdes surge como una alternativa de las prácticas habituales (incineración y el enterramiento o el abandono del material hasta su descomposición) realizadas a los residuos de jardinería (Román et al., 2013). Sin embargo, debido al largo ciclo de este proceso a causa del alto contenido lignocelulósico (Yu et al., 2018), se busca su mejoramiento y optimización con la adición de otros cosustratos como lo son los residuos de alimentos, roca fosfórica, aserrín, entre otros.

2.4. Parámetros operativos y de calidad

La Tabla 1 presenta los parámetros de monitoreo de proceso.

Tabla 1*Parámetros operativos y de calidad*

Parámetro	Condición	Referencia
pH	El pH recomendado para realizar el proceso de compostaje de manera óptima está en un rango de 6,5 y 9.	(Colombia. ICONTEC, 2004)
Tamaño de partícula	El tamaño ideal de los materiales para iniciar el proceso de compostaje esta entre los 5 a 20 cm.	(Román et al., 2013)
Temperatura	La temperatura no debe decaer por debajo de los 20°C interrumpiendo con la actividad microbiana, ni superar los 65°C, ya que algunos de los microorganismos podrían morir o inhibirse.	(Román et al., 2013)
Conductividad eléctrica	La conductividad eléctrica (CE) mide la concentración de sales solubles presentes en el producto final y la presencia de iones de amonio o nitrato formados durante el proceso.	(Bueno Márquez et al., 2008)
Humedad	Para una máxima eficiencia en el proceso de degradación esta se debe mantener entre el 45% y el 60%, si este porcentaje es menor disminuye la actividad microbiana y en caso de un exceso se interferirá la oxigenación del material.	(Román et al., 2013)
Índice de germinación	Los valores de índice de germinación por debajo de 50% indican una alta fitotoxicidad del material, entre el 50% y el 80% una fitotoxicidad moderada, finalmente cuando los valores superan el 80% se considera que el material no presenta fitotoxicidad.	(Iglesias Jiménez et al., 2008)
Prueba de auto calentamiento	El aumento de la temperatura presentado en el material respecto a la temperatura de incubación permite la cuantificación de la estabilización de la materia orgánica.	(Chavéz Pérez, 2015)

2.5. Inóculos bacterianos

En el proceso de compostaje la degradación de los sustratos es realizada por diferentes tipos de microorganismos (Cardona Castelblanco & Hernández Rios, 2008). La adición de agentes inoculantes (microorganismos) puede incrementar las tasas de degradación de la materia orgánica y de lignocelulosa llegando a valores en un rango de 25%-37% (Yu et al., 2018)(Hernández-Gómez, 2020), reduciendo el tiempo en el proceso de compostaje (Reyes-Torres et al., 2018). Esto

debido a que la adición de un inóculo compuesto aumenta y regula la actividad de las enzimas clave como son las carboximetil celulosa (CMCase), xilanasa, manganeso peroxidasa (MnP), lignina peroxidasa (LiP) y lactasa (Lac) y mejora la diversidad de la comunidad bacteriana durante el compostaje, resultando en la mejora de la degradación de la lignocelulosa (Wei et al., 2019)(Hu et al., 2019).

2.6. Estado del arte

La Tabla 2 se muestran algunos de los estudios sobre la inoculación del compostaje de RV con RA y también con otros tipos de residuos que han permitido evidenciar los efectos que tienen cierto tipo de inóculos en la reducción del tiempo del proceso y en la calidad el producto final. En esta tabla se observa que el método de aplicación de inóculos más utilizado es en medio líquido, con una concentración en un rango entre 1×10^6 y 1×10^9 ufc/ml. Las etapas de compostaje en las que se realizó la inoculación y presentaron mejores resultados en cuanto a la degradación de lignocelulosa son la termofílica y enfriamiento. Dependiendo del inoculante y el tipo de residuo utilizado, se pueden presentar mejores resultados en diferentes etapas, debido a la resistencia y comportamiento de estos a las diferentes temperaturas.

En la Tabla 3 se presentan algunos de los parámetros registrados en diferentes artículos relacionados con la inoculación en procesos de compostaje, esto para tener referencia a la hora de realizar análisis de resultados y conclusiones.

Tabla 2*Inóculos microbianos utilizados en el compostaje de residuos*

Tipo de residuo	Inóculo	Cantidad de inóculo adicionada	Etapas de adición del inóculo	Principal conclusión del estudio	Referencia
Residuos de alimentos con residuos verdes	EM	500 ml	Inicio del proceso	La adición del inóculo mostro una reducción aproximadamente del 34% en el periodo de degradación activa y una degradación de la lignina, celulosa y hemicelulosa del 32%, 35% y 38% respectivamente.	(Manu et al., 2017)
Residuos verdes	Compound inoculum <i>Phanerochaete</i> <i>chrysosporium</i> EM	2,97x10 ⁴ ufc/g 6,69x10 ⁶ ufc/g 1,83x10 ⁵ ufc/g	Maduración	La tasa de degradación total de la lignina y la celulosa puede alcanzar el 25,47%, valor cercano al teórico (27,81%) obtenido del experimento ortogonal de regresión cuadrática	(Yu et al., 2018)
Residuos sólidos municipales con residuos verdes	<i>Nitrobacter</i> y <i>Thiobacillus</i>	>1x10 ⁸ ufc/ml	Inicio del proceso	La inoculación de microbios mejoró el progreso y la eficiencia del compostaje, potenciando la biodegradación de alifáticos, proteínas y polisacáridos, y aumentó el grado de humificación de los materiales de compostaje.	(Xi et al., 2012)
Residuos verdes	<i>Bacilo altitudinis</i> <i>Alternaria tenuissima</i> <i>Gibellulopsis nigrescens</i> <i>Streptomyces albus</i> <i>Bacilo licheniformis</i> <i>Bacillus smithii</i>	1x10 ⁶ ufc/g	8, 15 y 24 días de iniciado el proceso	La degradación de hemicelulosa, celulosa y lignina fue 28%, 21% y 25% respectivamente mayor a la degradación en las pilas de control. La inoculación provocó una estimulación elevada de la microbiota del compostaje, logrando tasas de humificación más rápidas y una mayor estabilidad en el producto final.	(Jurado et al., 2015)
Residuos sólidos urbanos	<i>Bacillus subtilis</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Aspergillus fumigatus</i>	1x10 ⁷ ufc/ml	Inicio del proceso	Las pilas de compostaje alcanzan su estabilidad y madurez en menor tiempo al ser inoculadas en comparación a los testigos sin inocular. Los microorganismos seleccionados minimizan el riesgo de impacto negativo en el ambiente y generaron un producto de calidad con una mayor retención de nutrientes.	(Cariello et al., 2007)
Residuos de poda de jardín y residuos domésticos	<i>Streptomyces albogriseolus</i> <i>Streptomyces tendae</i> <i>Aspergillus fumigatus</i>	>1x10 ⁹ ufc/ml	Inicio del proceso	Tanto las actinobacterias como el hongo mostraron ser termófilos. El consorcio de microorganismos fue positivo, ya que disminuyó la proporción C/N hasta un valor menor a 25, lo cual significa un mayor grado de madurez, sugiriendo la utilización de estos para acelerar el proceso de compostaje.	(Camacho et al., 2014)
Estiércol de pollo y paja de maíz	<i>Streptomyces sp.</i> y <i>Micromonospora sp.</i>	1x10 ⁸ ufc/ml	Termofílica Mesofílica Enfriamiento	La adición del inóculo en la etapa de enfriamiento del compostaje mejora la diversidad de la comunidad de actinobacterias, además de acelerar claramente la degradación de la materia orgánica hasta lograr disminuirla a un 35,21%, especialmente las celulosas.	(Zhao et al., 2016)

Nota. EM: Microorganismos efectivos; HPB: Bacterias productoras de hidrolasa; ufc: Unidad formadora de colonias.

Tabla 3*Parámetros registrados en productos de compostaje*

Tipo de residuo	Inóculo	Etapa de adición del inóculo	Parámetros registrados	Referencia
Residuos verdes	<i>Compuesto (Bacilo sp. y Aspergilo sp.)</i>	Maduración	pH: 8,34 - 8,39 CE: 0,56 (ms/cm) IG: 102,17%	(Yu et al., 2018)
	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Maduración	pH: 8,34 - 8,39 CE: 0,53 (ms/cm) IG: 102,73%	
	EM	Maduración	pH: 8,34 - 8,39 CE: 0,58 (ms/cm) IG: 101,73%	
Residuos verdes	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Inicial	pH: 7,73 IG: 96% C/N: 15% - 20%	(Chen et al., 2019)
	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Enfriamiento	pH: 8,43 IG: 103,11% C/N: 15% - 20%	
Residuos verdes	<i>Trametes versicolor</i>	0 días de iniciado el proceso.	pH: 8,09 CE: 1,96 (ms/cm) COT: 26,62 (g/kg) IG: 113,9% C/N: 14,81	(Gong et al., 2017)
	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	14 días de iniciado el proceso.	pH: 8,16 CE: 1,85 (ms/cm) COT: 26,00 (g/kg) IG: 118,6% C/N: 14,55	
Residuos de alimentos con residuos verdes	EM	Inicial	pH: 7,3 CE: 2,2 (dS/m) IG: 90% C/N: 9,7	(Manu et al., 2017)
Residuos sólidos urbanos	<i>Bacillus subtilis</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Aspergillus fumigatus</i>	Inicial	pH: 7,7 C/N: 15 CE: 0,57-3,95 (dS/m)	(Cariello et al., 2007)
Residuos de poda de jardín y residuos domésticos	<i>Streptomyces albogriseolus</i> <i>Streptomyces tendae</i> <i>Aspergillus fumigatus</i>	Inicial	pH: >8 C/N: 6,44 - 7,99 NT: 1,95 - 2,22	(Camacho et al., 2014)
Residuos verdes	<i>Bacillus licheniformis</i> <i>Bacillus sonorensis</i>	1, 11 y 23 días de iniciado el proceso.	pH: 7,5 - 8 CE: 5 - 6 (ms/cm) COT: 22,9% - 25,8% NT: 1,54% - 1,84% C/N: 12,8 - 16,7 IG: 86% - 100%	(Abdel-Rahman et al., 2016)
Residuos verdes	<i>Aeromonas caviae sp.</i> <i>Shinella sp.</i> <i>Rhizobium sp.</i> <i>Corynebacterium pseudotuberculosis sp.</i> <i>Streptomyces clavuligerus sp.</i>	ND	pH: 7,3 - 7,5 CE: 1 - 1,4 (ms/cm) COT: 31% - 34% NT: 1,7% - 2,2% C/N: 16,3 - 19 IG: 80% - 90%	(Du et al., 2021)

Nota. EM: Microorganismos efectivos, CE: Conductividad eléctrica, COT: Carbono orgánico total, IG: Índice de germinación, C/N: Relación carbono-nitrógeno, NT: Nitrógeno total; ND: No datos.

3. Metodología

El proyecto se realizó en dos fases: *i*) Efecto de la incorporación de un inóculo bacteriano compuesto sobre la eficiencia del proceso y *ii*) Influencia del inóculo bacteriano sobre parámetros de calidad del producto final.

3.1. Fase 1: Efecto de la incorporación de un inóculo bacteriano compuesto sobre la eficiencia del proceso

3.1.1. Caracterización del sustrato

Los RV proceden de la Universidad Industrial de Santander, compuestos por hojas secas, raíces, ramas, poda de césped, flores, frutos y pequeñas porciones de suelo (Cardona Castelblanco & Hernández Rios, 2008). Los RA fueron alimentos no procesados (RANP) y alimentos procesados (RAP). Estos se recolectaron de una plaza de mercado de una zona con aproximadamente 180.000 habitantes, constituidos por carbohidratos (cáscaras de tubérculos), frutas y cáscaras de verduras. Adicionalmente, se utilizó aserrín como material de soporte para proporcionar porosidad y estructura; y roca fosfórica (RF) al 2% como material de enmienda para proveer fósforo y contribuir a la reducción de volatilización de nitrógeno (Oviedo-ocaña et al., 2021)(Hernández-Gómez, 2020).

Los RV y RA se trituraron manualmente para reducir el tamaño de las partículas (entre 30 y 50 mm) (Reyes-Torres et al., 2018) y luego se caracterizaron acorde con parámetros como: pH, humedad y conductividad eléctrica (CE) acorde con la NTC 5167; carbono orgánico total (COT) a través del contenido de cenizas y nitrógeno total (NT) a partir de la NTC 370; relación C/N. Estas mediciones se realizaron por triplicado y se hicieron análisis estadísticos estándar (promedios y desviaciones).

3.1.2. Montaje experimental

Para el ensayo se consideraron 4 pilas de 120 kg con los sustratos triturados, aserrín y RF. La proporción de mezcla de sustratos en cada pila fue de 50% RV, 35% de residuos de alimentos no procesados (RANP), 13% de aserrín y 2% de RF, proporción definida acorde con estudios previos realizados por el grupo de Investigación GPH (Angarita Rangel & Rodríguez Flórez, 2018)(Hernández-Gómez, 2020). Estas unidades experimentales se ubicaron en un área experimental (5 m de ancho x 12 m de largo) perteneciente a la Universidad Industrial de Santander (UIS) que contaba con techo y poli sombras laterales para evitar afectaciones por precipitación e ingreso de agentes externos, las unidades experimentales se dispusieron con aproximadamente un metro de separación entre ellas sobre un suelo nivelado cubierto por plástico para evitar el ingreso organismos externos por contacto.

El inóculo provino del aislamiento de cepas bacterianas (*Paenibacillus sp.* y *Bacillus sp.*) de un experimento previo del co-compostaje de RA con RV (Angarita Rangel & Rodríguez Flórez, 2018). La forma de aplicación del inóculo fue líquida con el medio de cultivo Luria Bertani (LB) (Hernández-Gómez, 2020). La adición del inóculo se realizó al comienzo de la fase de enfriamiento para promover la degradación de la lignocelulosa y mejorar la humificación del

producto final (Chen et al., 2019), siendo 9.0 mL/kg para *Paenibacillus sp* y 4.8 mL/kg de *Bacillus sp*, concentración definida por el grupo GPH en proyectos previos (Hernández-Gómez, 2020).

Se considero como factor de estudio la presencia y ausencia del inóculo compuesto microbiano, por lo cual se tuvieron dos tratamientos: T1 en el que se adiciono el inóculo compuesto al compostaje de RV con RA y T2 que correspondió al control de solo RV y RA sin adición de inóculo. Cada tratamiento se realizó por duplicado, por lo cual se tuvieron en total cuatro unidades experimentales.

El monitoreo del proceso se realizó en términos de parámetros como la temperatura medida con termómetro en los puntos perimetrales y en el centro de cada pila; la humedad determinada a 70 °C por gravimetría; el pH determinado mediante el método potenciométrico (pHmetro sensION™ + MM374) utilizando una muestra solida de 10g disuelta en 50 mL de agua destilada (i.e. proporción 1:10, p/v); la CE medida de la misma muestra de pH tomando como guía las sugerencias de la Norma Técnica Colombiana-NTC 5167; el COT a partir del contenido de cenizas determinado mediante gravimetría a 550 °C (Zhang & Sun, 2017), por otro lado el NT se midió a través de titulometría con el indicador nitrógeno total Kjeldahl y la degradación de lignocelulosa acorde con el protocolo propuesto por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Sluiter et al., 2012). La frecuencia de medición para temperatura fue diaria, mientras que pH y CE se determinaron dos veces a la semana; NT, COT y lignocelulosa se determinaron una vez a la semana. Por otro lado, se monitoreó el índice de germinación (IG) una vez por semana durante la fase de enfriamiento y maduración, para lo cual se usó semillas de rábano (*Raphanus sativus*) por su sensibilidad a la presencia de sustancias fitotóxicas (Komilis & Tziouvaras, 2009).

La frecuencia de volteo se realizó manualmente en función del gradiente de temperatura que tuvieron las unidades experimentales, es decir, cuando la temperatura fuera superior a 65 °C

o esta variable se mantuviera constante por más de dos días consecutivos, se realizaba volteo manual del material (Román et al., 2013). Finalmente, se consideró la finalización del proceso cuando la temperatura de los tratamientos fue próxima a la temperatura ambiente del sitio del montaje.

3.1.3. Efecto del inóculo sobre la eficiencia del proceso

La eficiencia del proceso se determinó considerando los siguientes criterios: (I) duración de la fase de enfriamiento y (II) porcentaje de biodegradación de lignocelulosa. Esta última se determinó acorde con NREAL a través de las Ecuaciones 1 y 2. Los resultados encontrados se contrastaron con el tratamiento control y lo reportado en la literatura especializada.

$$\%Lignocelulosa = 100\% - \%Humedad - \%Cenizas - \%Extractivos \quad (1)$$

$$\%Degradación = \left(1 - \frac{Lignocelulosa\ final}{Lignocelulosa\ inicial}\right) * 100 \quad (2)$$

3.2. Fase 2: Influencia del inóculo bacteriano sobre parámetros de calidad del producto final

3.2.1. Influencia del inóculo sobre la calidad del producto

Una vez concluido el proceso, el material fue cernido en un tamiz ASTM N°4 y se tomaron 2 kg para caracterizar el producto en términos de humedad, pH, CE, COT, NT, IG y prueba de autocalentamiento. Se midió la madurez utilizando pH, CE, C/N e IG y se determinó la estabilidad del producto mediante la prueba de autocalentamiento de Rottegrade (Lü et al., 2018) y la

degradación de carbono. Estos datos se contrastaron con la normativa colombiana (NTC 5167) y la chilena (NCh2880).

3.2.2. Análisis estadístico

Se procesaron los datos mediante el uso de herramientas de estadística descriptiva como promedios y desviaciones utilizando el software Excel de Microsoft office 365.

4. Análisis de resultados

4.1. Fase 1: Efecto de la incorporación de un inóculo bacteriano compuesto sobre la eficiencia del proceso.

4.1.1. Monitoreo del proceso

Se recopilaron los datos de las cuatro unidades experimentales y se promediaron los valores para los tratamientos T1 y T2 con el fin de obtener un mejor análisis de los parámetros fisicoquímicos.

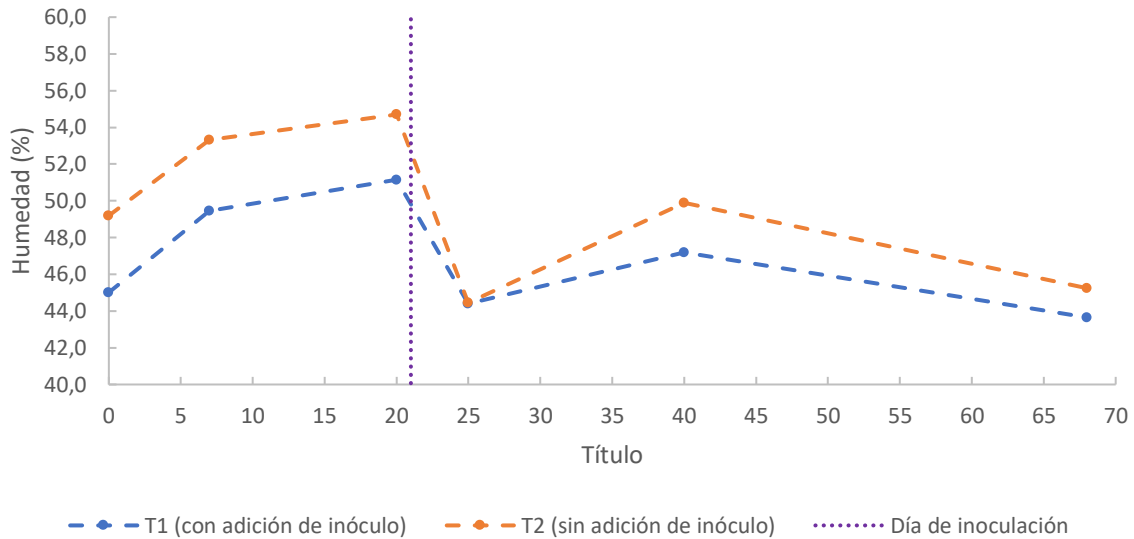
- **Humedad**

La humedad está vinculada al crecimiento y a los procesos metabólicos de los microorganismos (Cardona Castelblanco & Hernández Rios, 2008). Esta se controló de forma visual mediante inspección, realizando adiciones de agua si se reportaban bajos niveles de humedad en el laboratorio, con el fin de mantener este parámetro dentro de un rango del 45% y

60% y así obtener la mayor eficiencia en el proceso (Román et al., 2013). Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 1.

Figura 1

Perfiles de humedad de los tratamientos

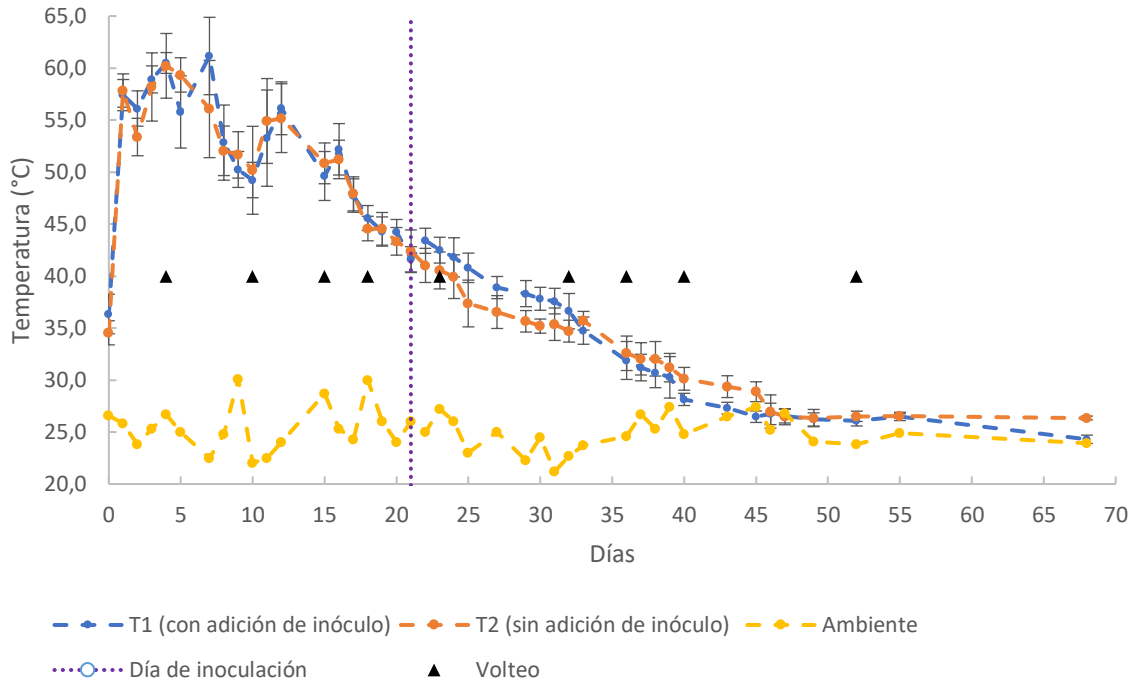


- **Temperatura**

La temperatura determina la tasa de degradación de materia orgánica del proceso, por ende, puede afectar los niveles de actividad microbiana y la eficiencia del compostaje (Hu et al., 2019). La Figura 2 muestra el comportamiento de la temperatura durante el proceso y los momentos en los que se realizaron volteos. Estos influyeron en la fluctuación de las temperaturas ya que permiten la aireación y redistribución del material de la mezcla, mejorando la degradación de la materia orgánica.

Figura 2

Perfiles de temperatura de los tratamientos



En la Tabla 4 se puede ver como el comportamiento de T1 y T2 fue similar en las primeras 2 fases del proceso (mesofílica y termofílica), ya que se encontraban en condiciones operacionales semejantes y las proporciones de mezcla fueron las mismas.

Tabla 4

Resumen proceso de compostaje

Tratamiento	Duración fase (días)			Temp max (°C)	Tiempo para Tmax (días)	pH max
	Mesofílica	Termofílica	Enfriamiento			
T1A	1	19	21	61,5	7	8,9
T1B	1	19	21	60,8	7	8,9
T2A	1	18	25	62,6	1	9
T2B	1	18	27	59,3	4	9

Nota: T1: tratamiento inoculado; T2: Tratamiento de RV+RA

Cuando alcanzó temperaturas superiores a 45 °C, la mezcla pasó de la fase mesofílica, la cual tuvo una duración de 1 día al igual que lo registró (Hernández-Gómez, 2020) e inició la fase termofílica, en la cual ocurre una fácil degradación de sustratos solubles y la transformación por microorganismos de los componentes de lignocelulosa (Manu et al., 2017). Ambos tratamientos alcanzaron temperaturas típicas de rango termofílico (i.e. cercanas a los 58 °C), mostrando un incremento acelerado debido a la liberación de calor causada por la degradación de materia orgánica por acción microbiana, degradando compuestos simples como azúcares, aminoácidos y proteínas presentes principalmente en los residuos de alimentos que contiene la mezcla (Hernández-Gómez, 2020). La presencia de temperaturas por encima de los 55 °C durante al menos 3 días se considera suficiente para la destrucción de la mayoría de parásitos, semillas de malas hierbas y patógenos humanos y vegetales (Manu et al., 2017)(Sánchez Díaz, 2009); esta condición se logró en todos los tratamientos. La fase termofílica duró 19 días para el T1 y 18 días para el T2, donde se logró un pico máximo de los 61.2 °C y 60.1 °C respectivamente.

Al iniciar la fase de enfriamiento a los 20 días para el T1 y 19 días para el T2, las temperaturas descendieron por debajo de los 45 °C posiblemente debido al agotamiento de las fuentes de energía como el carbono ocasionando que los microorganismos disminuyan su actividad metabólica, utilizando como nutrientes los materiales más resistentes a la biodegradación como lo son la celulosa y la lignina (Cardona Castelblanco & Hernández Rios, 2008). Con la adición del inóculo bacteriano en el día 21 del proceso, se presentó un aumento de temperatura formando un pico al día siguiente, debido a la liberación de calor vinculada con una buena proliferación de los microorganismos (Yu et al., 2018) y consiguio una mayor degradación de la materia orgánica, a partir del cual el T1 mantuvo temperaturas superiores al T2 hasta el día 33. Ambos tratamientos continuaron en esta fase, teniendo una duración de 21 días para el T1 y 26 días para el T2.

Finalmente, se ingresó en fase de maduración, donde las temperaturas descendieron hasta alcanzar la temperatura ambiente y culminó el proceso de compostaje.

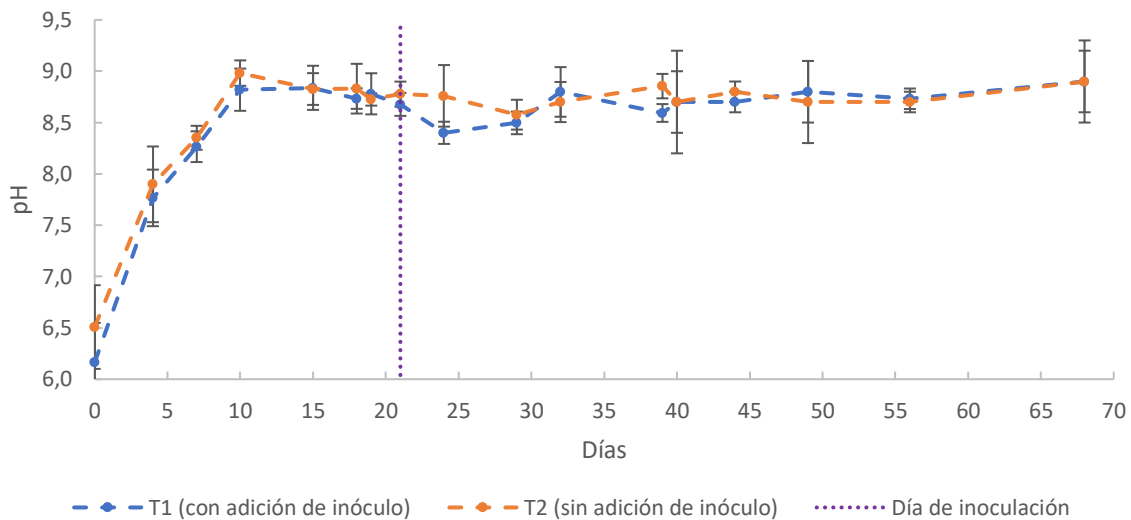
- **pH**

El pH varía con el tiempo durante el proceso de compostaje y tiene una influencia directa debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos (Bueno Márquez et al., 2008).

En la Figura 3 se observa el comportamiento de este parámetro durante el proceso.

Figura 3

Perfiles de pH de los tratamientos



Al iniciar el montaje se presentaron valores de pH de 6.5 para el T1 y 6.2 para el T2, mostrando un incremento acelerado durante los primeros 10 días. Este ascenso puede deberse a la mineralización de compuestos nitrogenados (proteínas) presentes en los RA que con llevan a la liberación de amoníaco y como consecuencia del consumo microbiano de ácidos orgánicos (Yu et al., 2018). Luego de esto, el pH tendió a mantenerse en un rango entre 8.6 y 9.0 teniendo descensos los cuales pueden atribuirse a procesos relacionados a la nitrificación como la acidificación natural,

la producción de compuestos fenólicos, así como la volatilización del amoníaco (Yu et al., 2018)(Gong et al., 2017).

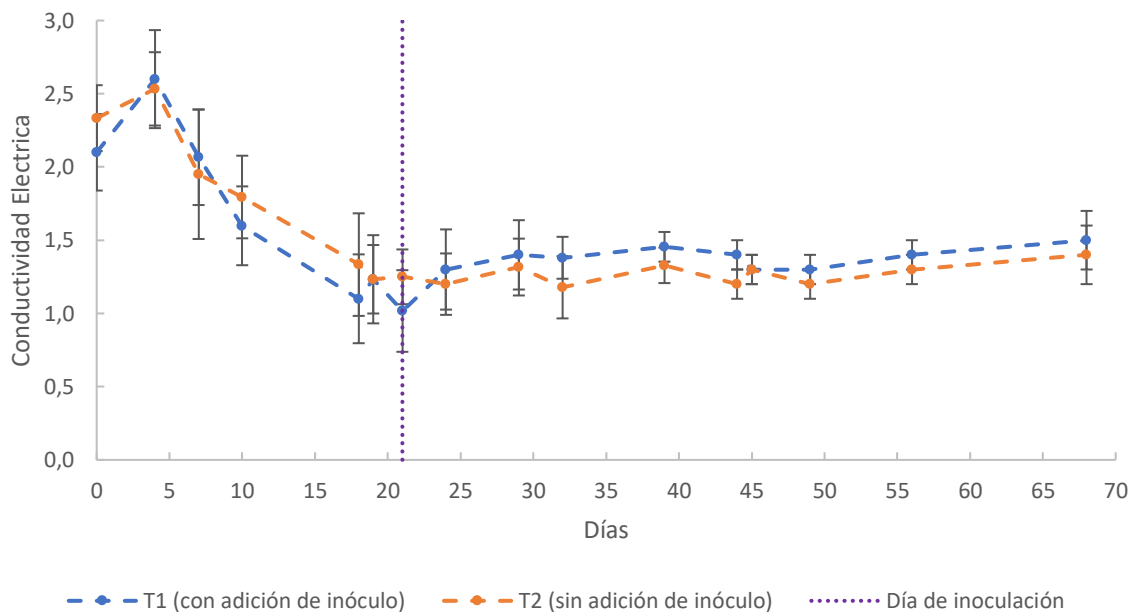
Los tratamientos llegaron a valores máximos de 8.9 para el T1 y 9.0 para el T2 y al igual que (Yu et al., 2018) no se evidenciaron cambios significativos relacionados a la adición del inóculo que mantuvieran el pH en valores más altos en comparación al tratamiento de control.

- **Conductividad eléctrica (CE)**

La conductividad eléctrica muestra la concentración de iones inorgánicos solubles (sales) en agua presentes en el compostaje (Hernández-Gómez, 2020); está determinada por la composición y propiedades del material presente en los sustratos (Marín Bahamón, 2019). El comportamiento de la CE se presenta en la Figura 4.

Figura 4

Perfiles de CE de los tratamientos

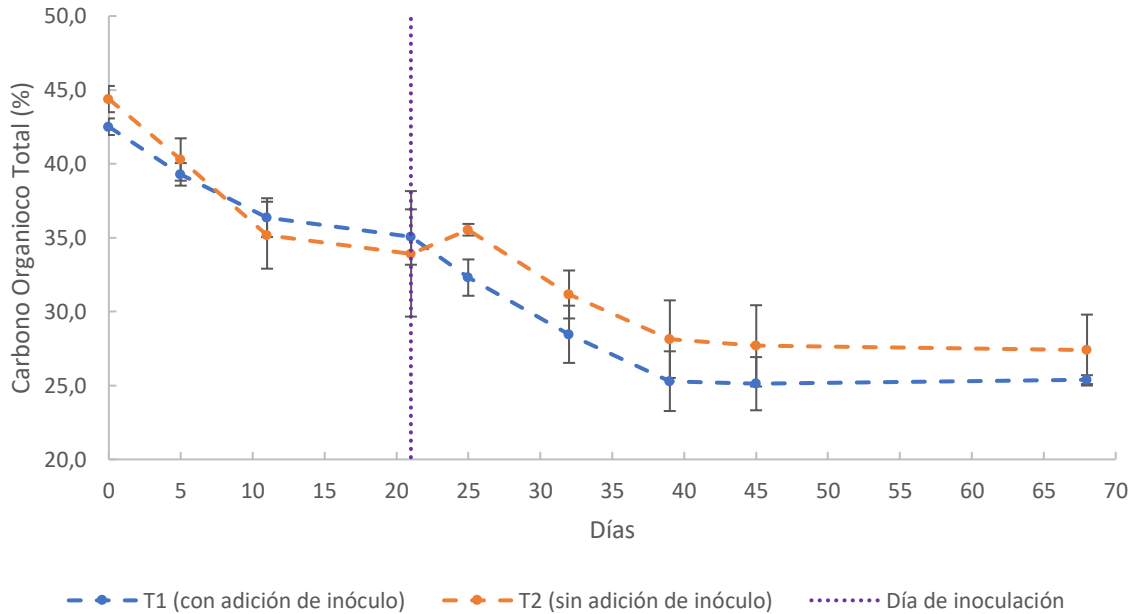


Durante los primeros días la CE ascendió hasta llegar a un máximo de 2.6 dS m^{-1} para T1 y 2.5 dS m^{-1} para T2, lo que se puede atribuir a la descomposición de la materia orgánica por microorganismos donde se liberan minerales como fosfato, amonio y potasio (Hernández-Gómez, 2020). Estos resultados fueron inferiores a 3 mS/cm que es considerado como límite para generar un potencial efecto fitotóxico por salinidad (Bernal et al., 2017). A partir del día 4 ambos tratamientos presentaron un descenso hasta el día 21, lo cual puede deberse a la volatilización del amoníaco y a la precipitación y lixiviación de las sales minerales (Gong et al., 2017).

Posteriormente durante la etapa de enfriamiento, al realizar la adición del inóculo bacteriano compuesto, se presentó un comportamiento similar en los dos tratamientos, teniendo el T1 una CE superior e indicando una mayor transformación tanto de materia orgánica como de lignocelulosa hasta la finalización del proceso. Esto se puede relacionar con que la tasa de degradación fue mayor en el tratamiento inoculado que en el de control estando acorde a lo obtenido por (Gong et al., 2017). Al finalizar se dio un leve incremento en los tratamientos que pudo deberse a una ligera degradación de materia orgánica y retención de sales gracias a la roca fosfórica (Hernández-Gómez, 2020).

- **Carbono orgánico total (COT)**

El carbono es la principal fuente de energía para los microorganismos, donde una parte es utilizada para sus actividades metabólicas y el resto de esta energía es liberada en forma de calor (Hernández-Gómez, 2020). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.

Figura 5*Perfiles de COT de los tratamientos*

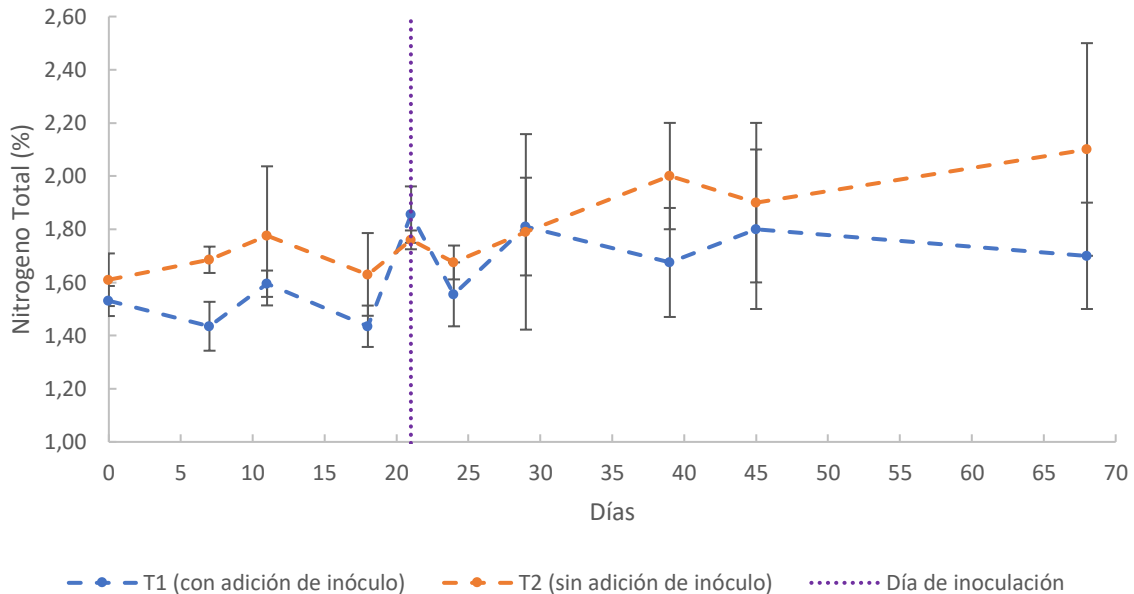
Al inicio del proceso se muestra un alto contenido de carbono aproximadamente 45%, proveniente de los RV y el aserrín presente en la mezcla, el cual disminuye debido a la descomposición microbiana de la materia orgánica de rápida degradación durante la fase termofílica hasta llegar a valores de 35% para T1 y 33.9% para T2. Durante la etapa de enfriamiento con la adición del inóculo, el T1 presentó un menor porcentaje de COT en comparación al T2, esto se puede relacionar con el aumento de la degradación de la materia orgánica por actividad microbiana consumiendo carbono como principal fuente de energía, y afectándolo de forma que puede restar valor agrícola al producto final. Finalmente, este parámetro se estabilizó en la fase de maduración con valores de 25.4% para el T1 y 27.4% para el T2, semejantes a los indicados por (Jiang et al., 2015) (24-28%).

- **Nitrógeno total (NT)**

Dentro del proceso de compostaje el nitrógeno permite la formación de las células microbianas, ocasionando que los microorganismos continúen su consumo de carbono y síntesis de las células mediante ciclos adicionales. La mineralización del contenido de nitrógeno en los residuos orgánicos depende del tipo y la forma de los RA y RV utilizados (Saldarriaga Elorza, 2009). Los resultados durante el proceso se presentan en la Figura 6.

Figura 6

Perfiles de NT de los tratamientos



Al inicio del proceso se presentaron valores de 1.53% para el T1 y 1.6% para el T2, luego estos se mantuvieron durante fase termofílica entre un rango de 1.4% a 1.6% y 1.6% a 1.8% respectivamente, debido a que posiblemente durante el proceso se presenta una pérdida por nitrógeno volátil y gracias a la producción por pérdidas de la materia orgánica, este se mantiene constante (Saldarriaga Elorza, 2009). Para el día 29, ambos tratamientos alcanzaron valores de NT de 1.8%, en el T1 debido a la presencia del inóculo se dio un mayor consumo de nitrógeno como

se ve en la Figura 6, causado por la degradación de los residuos al darse un aumento de la actividad de enzimas clave (Bohacz, 2017), finalizando el proceso con valores de 1.7% para el T1 y 2.1% para el T2, este último incrementando debido a la mineralización de la materia orgánica.

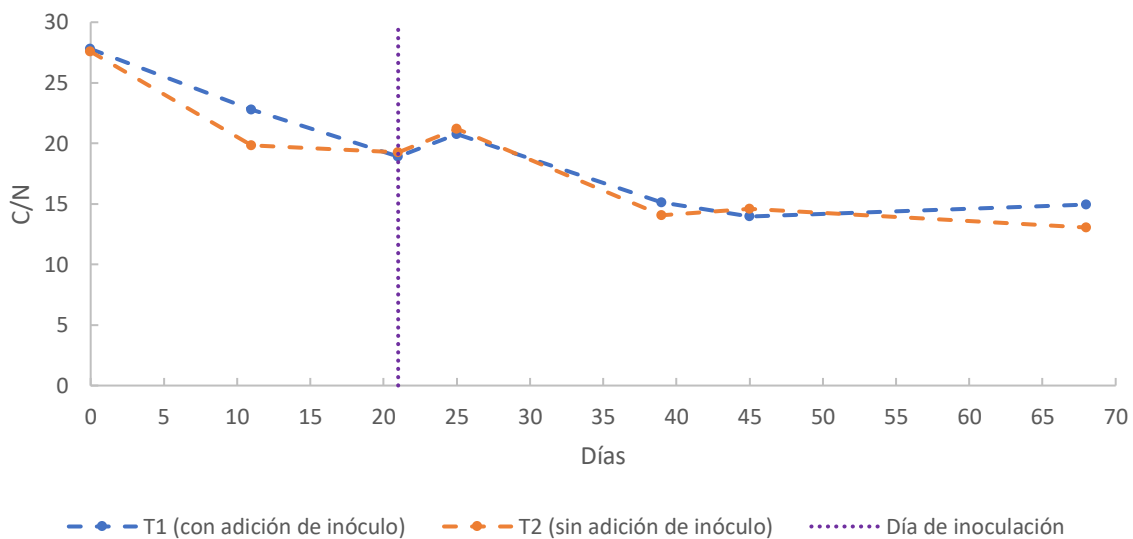
El comportamiento general de NT en el T1 no coincide con lo obtenido por (Camacho et al., 2014) el cual registró un menor consumo en el tratamiento inoculado que en el de control, esto puede deberse a que se utilizaron 2 cepas de actinobacterias y 1 hongo filamentoso para la inoculación, difiriendo de este estudio en el cual se utilizaron cepas bacterianas diferentes.

- **Relación C/N**

El carbono y el nitrógeno son los dos nutrientes más importantes para el crecimiento y la actividad microbiológica presente en el proceso de compostaje. Por lo que la relación C/N es un indicador del grado de descomposición de la materia orgánica (Hernández-Gómez, 2020). Los valores obtenidos se presentan en la Figura 7.

Figura 7

Perfiles de C/N de los tratamientos



Al inicio del proceso se registraron valores de aproximadamente 27.7 para ambos tratamientos, valores dentro del rango recomendado (25-30) acorde con (Hernández-Gómez, 2020). Posteriormente la relación C/N decrece en T1 y T2 debido a que la tasa de mineralización de nitrógeno orgánico es más baja que la de carbono orgánico (Gong et al., 2017). La adición del inóculo no generó cambios significativos a comparación con el tratamiento de control, ambos tratamientos presentaron valores ≤ 15 , indicando probablemente productos maduros y aptos para agronomía (Gong et al., 2017).

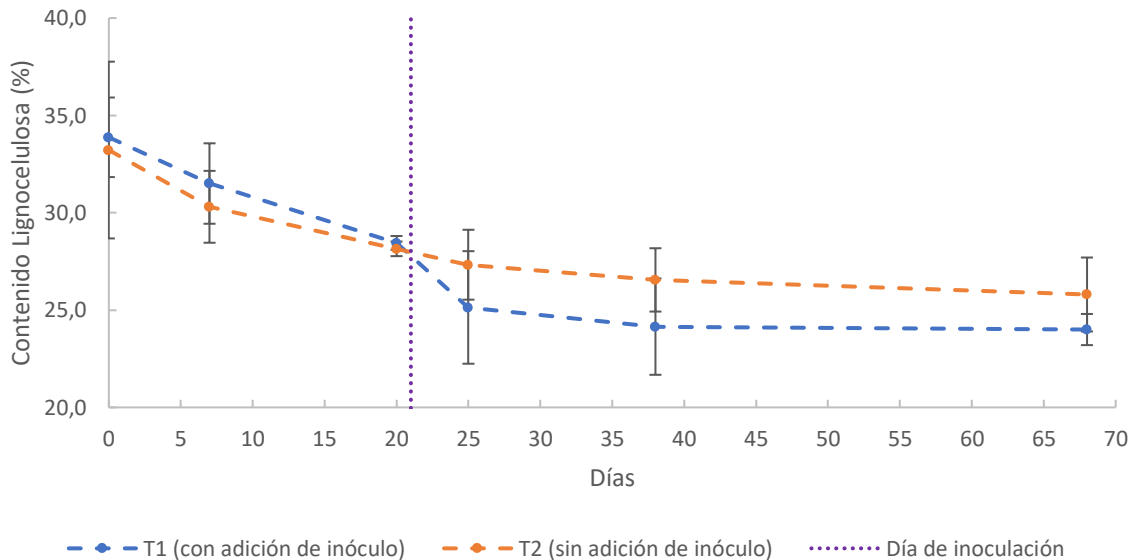
Comparando con otros autores que trabajaron con RV como son (Camacho et al., 2014) y (Gong et al., 2017) quienes obtuvieron valores de C/N menores en los tratamientos inoculados en comparación a los de control, estos difieren de lo obtenido en este estudio, donde el T1 presenta una mayor relación C/N en comparación con T2 debido al mayor consumo de NT presentado por el tratamiento inoculado.

- **Degradación de lignocelulosa**

La lignocelulosa es una macromolécula de difícil descomposición la cual consiste en una mezcla compleja de tres biopolímeros naturales los cuales están estrechamente unidos; la celulosa y hemicelulosa, de rápida biodegradación y principales fuentes de carbono, y lignina la cual es un polímero resistente a la biodegradación que actúa como barrera física ralentizando el proceso de compostaje (Hernández-Gómez, 2020). Los datos obtenidos se presentan en la Figura 8.

Figura 8

Perfiles de Contenido de lignocelulosa de los tratamientos



Al inicio del proceso los tratamientos presentan un contenido de lignocelulosa de 33.9% para el T1 y 33.2% para el T2, descendiendo progresivamente durante las fases mesofílica y termofílica hasta llegar a un valor cercano al 28% en el día 21, en el cual se realizó la adición del inóculo en el T1. Posteriormente este tratamiento presentó menores porcentajes de contenido de lignocelulosa hasta la finalización del proceso siendo esta un 1.8% menor en comparación al T2. Esto indicó que la adición del inóculo podría aumentar la actividad de las enzimas clave y mejorar la diversidad de la comunidad bacteriana durante el compostaje (Hu et al., 2019). Finalmente, con los datos obtenidos se calculó el porcentaje de degradación para cada uno de los tratamientos, siendo estos 29.15% para el T1 y 22.34% para el T2.

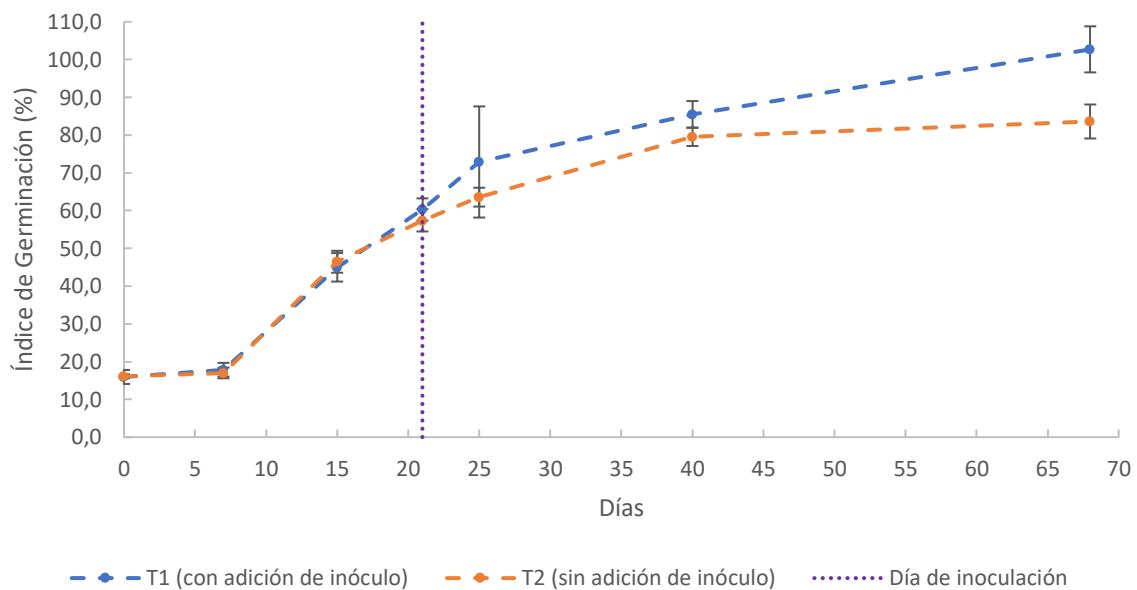
El porcentaje de degradación de lignocelulosa obtenido (29.15%) superó los valores registrados por (Yu et al., 2018) de 25.47% por un inóculo compuesto, por lo que se puede considerar efectivo el producto final obtenido.

- **Índice de germinación (IG)**

Este es un índice de fitotoxicidad con el cual se evalúa la toxicidad del compost, se usa para determinar la madurez de una muestra. Los resultados del análisis realizado se presentan en la Figura 9.

Figura 9

Perfiles de IG de los tratamientos



En el inicio del proceso, ambos tratamientos presentaron valores cercanos a 16% y mantuvieron un comportamiento similar durante las etapas mesofílica y termofílica. Posteriormente durante la etapa de enfriamiento el T1 presentó un índice considerablemente mayor al del T2, ambos superando valores de IG del 80% indicando que el producto de ambos tratamientos no es fitotóxico y su posible madurez (Hernández-Gómez, 2020), lo cual ocurrió en el día 40 para el T1 y en el día 68 para el T2, evidenciando que con la inoculación se puede reducir el tiempo necesario para obtener un producto maduro. Finalmente se registraron valores de 102.7% para el T1 y de 83.6% para T2, que comparando con los obtenidos por (Abdel-Rahman et al., 2016)

y (Gong et al., 2017) de 100% y 118.6% respectivamente, muestran la efectividad de la inoculación en procesos de compostaje.

4.1.2. Efecto del inóculo sobre la eficiencia del proceso

Con la adición del inóculo bacteriano compuesto en el T1 se presentó una reducción en la duración de la etapa enfriamiento y un incremento de la temperatura, lo que conlleva al aumento en la degradación de la lignocelulosa y de materia orgánica por la mayor presencia de microorganismos, los cuales consumen carbono como principal fuente de energía, disminuyendo la presencia de COT en la mezcla e incrementando la CE. La incorporación del inóculo también tuvo un efecto positivo al promover la degradación de sustancias potencialmente fitotóxicas resultando en el incremento del IG.

En cuanto a la eficiencia del proceso es importante destacar el tiempo de duración, donde se logró una reducción de 4 días en el T1 con respecto al T2, y una duración total del proceso de 41 días considerando una temperatura próxima al ambiente, que comparándolo con otros autores que inocularon en etapa de enfriamiento como lo son (Yu et al., 2018) y (Wu et al., 2020), estos requirieron un mayor tiempo de proceso (60 días) en compostaje de RV.

Otro parámetro que destacar es la degradación de lignocelulosa, obteniendo un valor de 29.15%. Al contrastar con otros estudios de compostaje de RV se encontró que (Yu et al., 2018) obtuvo valores degradación de hemicelulosa (34%), celulosa (25%) y lignina (27%); y (Jurado et al., 2015) valores de 28%, 21% y 25% respectivamente. A partir de esto se observó que en este estudio se obtuvo un porcentaje de degradación superior, demostrando su efectividad como producto final.

4.2. Fase 2: Influencia del inóculo bacteriano sobre parámetros de calidad del producto final

Tabla 5

Calidad de los productos finales por parámetros

Tratamiento	Cenizas (%)	COT (%)	CE (mS/cm)	W (%)	NT (%)	pH	IG (%)	C/N	PA (°C)
T1	26,0	25,4	1,5	43,7	1,7	8,9	102,7	14,9	3,5
T2	23,6	27,4	1,4	45,2	2,1	8,9	83,6	13,0	4,5
NTC 5167	<60	>15	-	<35	>1	>4 - <9	-	-	-
NCh 2880	-	-	<3	>30 - <45	≥0,5	>5 - <8,5	≥80	≤25	≤20

Nota: T1: tratamiento inoculado; T2: Tratamiento de RV+RA; W: Humedad; PA: prueba de autocalentamiento

La Tabla 5 muestra los parámetros fisicoquímicos de la calidad del producto de cada tratamiento y su comparativa con la normativa colombiana y la chilena. Empezando por el contenido de cenizas, ambos tratamientos tuvieron similares resultados (23-26%), cumpliendo con la NTC 5167, la cual tiene como límite un porcentaje menor a 60.

En cuanto al COT se obtuvieron valores entre 25-27%, superando el 15% de la NTC 5167, lo que significa que van a aportar carbono estable al suelo y va a permitir incrementar la capacidad de retención del agua y la aireación en el suelo (Roca et al., 2008).

La CE de los tratamientos dio cercana a 1.5 mS/cm, similar a lo reportado por (Gong et al., 2017), encontrándose por dentro del límite de los 3 mS/cm establecidos por la NCh 2880, lo que indica que no se generaran potenciales efectos fitotóxicos.

La humedad en los dos tratamientos alcanzó valores dentro del rango establecido por la normativa chilena (30-45%) y sobrepaso el límite de la normativa colombiana de 35%.

El NT del producto final tuvo valores superiores al 1% recomendado por la NTC 5167, al igual que el 0.5% de la NCh2880, lo que es favorable para su uso en actividades agrícolas. Estos valores podrían deberse a la alta porosidad proporcionada por la RF para la absorción del NH_3 y la mejora en la conservación del NT durante el proceso (Naher et al., 2018).

Respecto al pH, este fue alcalino, con valor cercano a 9.0 en ambos tratamientos, cumpliendo con el rango establecido por la NTC 5167 para su uso como producto mejorador de suelos. Se obtuvieron valores similares en otros estudios de co-compostaje como (Naher et al., 2018) y (Yu et al., 2018).

Se presentó un valor de IG mayor en el T1 que en el T2, sin embargo, ambos superaron el 80% recomendado por la NCh 2880, indicando que la fitotoxicidad se redujo a un nivel aceptable para su uso. Respecto a la madurez del producto tanto los valores de IG como la relación C/N fueron consistentes y cumplieron con la normativa chilena. La relación C/N estuvo entre 13 y 14, ajustándose dentro del límite (≤ 25) de la NCh 2880, indicando que el compostaje puede ser apto para agronomía.

Por último, se determinó la estabilidad del producto mediante la prueba de autocalentamiento de Rottegrade, en la cual se evidenció que ambos tratamientos pueden ser clasificados como clase V, indicando que el producto es estable y no generaría efectos adversos sobre el suelo (Manu et al., 2017).

5. Conclusiones

Este estudio evaluó el efecto de la adición de un inóculo bacteriano compuesto (*Paenibacillus sp.* y *Bacillus sp.*) en la eficiencia del proceso y calidad del producto final del co-compostaje de RV con RA. Los resultados de su adición en la etapa de enfriamiento fueron la reducción del tiempo en unos 4 días, un incremento del 6.8% en la degradación de lignocelulosa y una mejora en la humificación del producto final en comparación con el tratamiento de control.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos de calidad se obtuvieron valores similares en ambos tratamientos, mostrando que no hubo una mejora considerable, pero se cumple con lo recomendado por la NTC 5167 y NCh2880, lo cual indica que el producto final tiene un potencial valor agrícola.

6. Recomendaciones

Cultivar el inóculo lo más cerca posible del lugar donde se realizará el montaje para facilitar su transporte y manejo.

Plantear un sistema de monitoreo remoto mediante la utilización de sensores electrónicos para mantener un control constante y con mayor exactitud.

Buscar diferentes métodos de medición de nitrógeno total para obtener resultados más consistentes.

Proponer un sistema que garantice una dispersión homogénea del inóculo en las pilas.

Referencias Bibliográficas

- Abdel-Rahman, M. A., Nour El-Din, M., Refaat, B. M., Abdel-Shakour, E. H., Ewais, E. E. D., & Alrefaey, H. M. A. (2016). Biotechnological Application of Thermotolerant Cellulose-Decomposing Bacteria in Composting of Rice Straw. *Annals of Agricultural Sciences*, 61(1), 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2015.11.006>
- Agència de Residus de Catalunya. (2004). *Guía De Los Tratamientos De Las Deyecciones Ganaderas*. <http://www.arc.cat/es/altres/purins/guia/pdf/ficha4.pdf>
- Alcaldía Mayor de Bogotá, & Universidad Nacional de Colombia. (n.d.). Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura. *Secretaría Distrital de Hábitat*, 37–62.
- Angarita Rangel, M. A., & Rodríguez Flórez, L. V. (2018). *Aislamiento, selección y evaluación preliminar de la actividad enzimática de microorganismos aislados de pilas de compostaje de residuos verdes de la Universidad Industrial de Santander*. Universidad Industrial de Santander.
- Bernal, M. P., Sommer, S. G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., & Michel, F. C. (2017). *Chapter Three - Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits* (D. L. Sparks (ed.); Vol. 144, pp. 143–233). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.03.002>
- Bohacz, J. (2017). Lignocellulose-degrading enzymes, free-radical transformations during composting of lignocellulosic waste and biothermal phases in small-scale reactors. *Science of the Total Environment*, 580, 744–754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.021>
- Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J., & Cabrera Capitán, F. (2008). Factores que afectan al

- proceso de Compostaje. In *Compostaje* (pp. 93–111).
<https://doi.org/10.1002/adma.201604105>
- Camacho, A. D., Martínez, L., & Saad, H. R. (2014). Potencial De Algunos Microorganismos En El Compostaje De Residuos Sólidos. *Terra Latinoamericana*, 32(4), 291–300.
- Cardona Castelblanco, S., & Hernández Rios, L. J. (2008). Aprovechamiento de residuos de podas mediante compostaje en la escuela militar de aviación “Marco Fidel Suárez.” In *Universidad Autónoma de Occidente*.
- Cariello, M. E., Castañeda, L., Riobo, I., & González, J. (2007). Inoculante de microorganismos endógenos para acelerar el proceso compostaje de residuos sólidos urbanos. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 7(3), 26–35. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912007000300003>
- Chavéz Pérez, P. (2015). *Caracterización Físicoquímica y Madurez del Compost de las Ciudades de Tingo Maria y Aucayacu Mediante Test de Autocalentamiento*.
http://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/INFO RME FINAL PPP - CD.pdf
- Chen, Y., Wang, Y., Xu, Z., Liu, Y., & Duan, H. (2019). Enhanced humification of maize straw and canola residue during composting by inoculating *Phanerochaete chrysosporium* in the cooling period. *Bioresource Technology*, 293(June), 122075.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122075>
- Colombia. ICONTEC. (2004). NTC-5167-2004. Norma Técnica Colombiana: Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. *Diario Oficial Del ICONTEC*, 1–43.
http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/congresos/1compostaje_5normalizacion/BIBLIOG

RAFIA/Bib_Norma_Tecnica_Colombiana.pdf

- Du, X., Li, B., Chen, K., Zhao, C., Xu, L., Yang, Z., Sun, Q., Chandio, F. A., & Wu, G. (2021). Rice straw addition and biological inoculation promote the maturation of aerobic compost of rice straw biogas residue. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *11*(5), 1885–1896. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00587-y>
- Gong, X., Li, S., Sun, X., Zhang, L., Zhang, T., & Wei, L. (2017). Maturation of green waste compost as affected by inoculation with the white-rot fungi *Trametes versicolor* and *Phanerochaete chrysosporium*. *Environmental Technology (United Kingdom)*, *38*(7), 872–879. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1214622>
- Hernández-Gómez, A., Calderón, A., Medina, C., Sanchez-Torres, V., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2020). Implementation of strategies to optimize the co-composting of green waste and food waste in developing countries. A case study: Colombia. *Environmental Science and Pollution Research*, *i*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08103-w>
- Hernández-Gómez, A. M. (2020). *Alternativas biotecnológicas para el mejoramiento del proceso y la calidad del producto del co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos Trabajo*. Universidad Industrial de Santander.
- Hu, T., Wang, X., Zhen, L., Gu, J., Zhang, K., Wang, Q., Ma, J., & Peng, H. (2019). Effects of inoculation with lignocellulose-degrading microorganisms on antibiotic resistance genes and the bacterial community during co-composting of swine manure with spent mushroom substrate. *Environmental Pollution*, *252*, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.078>
- Iglesias Jiménez, E., Barral Silva, M. T., & Marhuenda Egea, F. C. (2008). Indicadores de estabilidad y madurez del compost. In *Compostaje* (pp. 242–284).

- Jiang, J., Liu, X., Huang, Y., & Huang, H. (2015). Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig manure composting. *Waste Management*, *39*, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.025>
- Jurado, M. M., Suárez-Estrella, F., López, M. J., Vargas-García, M. C., López-González, J. A., & Moreno, J. (2015). Enhanced turnover of organic matter fractions by microbial stimulation during lignocellulosic waste composting. *Bioresource Technology*, *186*, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.059>
- Komilis, D. P., & Tziouvaras, I. S. (2009). A statistical analysis to assess the maturity and stability of six composts. *Waste Management*, *29*(5), 1504–1513. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.016>
- Lü, F., Shao, L. M., Zhang, H., Fu, W. D., Feng, S. J., Zhan, L. T., Chen, Y. M., & He, P. J. (2018). Application of advanced techniques for the assessment of bio-stability of biowaste-derived residues: A minireview. *Bioresource Technology*, *248*, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.045>
- Manu, M. K., Kumar, R., & Garg, A. (2017). Performance assessment of improved composting system for food waste with varying aeration and use of microbial inoculum. *Bioresource Technology*, *234*, 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.023>
- Marín Bahamón, D. (2019). Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del municipio de Sopó Cundinamarca para la producción de un fertilizante órgano-mineral. In *Fundación Universidad de América* (Vol. 126, Issue 1).
- Monteiro, C., & Cannon, G. (2012). El gran tema de nutrición y salud pública en el ultra-procesamiento de alimentos. *World Nutrition*, *19*. www.wphna.org.
- Naher, U. A., Sarkar, M. I. U., Jahan, A., & Biswas, J. C. (2018). Co-Composting Urban Waste,

- Plant Residues, and Rock Phosphate: Biochemical Characterization and Evaluation of Compost Maturity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(6), 751–762. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1435799>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., & Sánchez, A. (2019). Co-composting of Green Waste Mixed with Unprocessed and Processed Food Waste: Influence on the Composting Process and Product Quality. *Waste and Biomass Valorization*, 10(1), 63–74. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0047-2>
- Oviedo-ocaña, E. R., Hernández-gómez, A. M., Ríos, M., Portela, A., Sánchez-torres, V., Domínguez, I., & Komilis, D. (2021). A comparison of two-stage and traditional co-composting of green waste and food waste amended with phosphate rock and sawdust. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su13031109>
- Reyes-Torres, M., Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., & Sánchez, A. (2018). A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies. *Waste Management*, 77, 486–499. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.037>
- Roca, I., Paz, A., & Vidal, E. (2008). Análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo tras la adición de compost procedente de RSU. *VIII Congreso SEAE, April 2008*, 1–24.
- Román, P., M. Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina. In *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Saldarriaga Elorza, J. F. (2009). Compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en el proceso de compostaje de los residuos sólidos urbanos con separación en la fuente y su efecto en la salud humana. In *Universidad de Medellin* (Vol. 27, Issue 7).
- Sánchez Díaz, I. (2009). *Estudio Técnico y Económico de una Planta de Tratamiento de Residuos*

Vegetales en Getafe. 97.

- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2012). Determination of structural carbohydrates and lignin in Biomass - NREL/TP-510-42618. *Laboratory Analytical Procedure (LAP)*, April 2008, 17. <http://www.nrel.gov/docs/gen/fy13/42618.pdf>
- Wei, Y., Wu, D., Wei, D., Zhao, Y., Wu, J., Xie, X., Zhang, R., & Wei, Z. (2019). Improved lignocellulose-degrading performance during straw composting from diverse sources with actinomycetes inoculation by regulating the key enzyme activities. *Bioresource Technology*, 271(August 2018), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.081>
- Wu, D., Wei, Z., Qu, F., Mohamed, T. A., Zhu, L., Zhao, Y., Jia, L., Zhao, R., Liu, L., & Li, P. (2020). Effect of Fenton pretreatment combined with bacteria inoculation on humic substances formation during lignocellulosic biomass composting derived from rice straw. *Bioresource Technology*, 303(January). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122849>
- Xi, B. D., He, X. S., Wei, Z. M., Jiang, Y. H., Li, M. X., Li, D., Li, Y., & Dang, Q. L. (2012). Effect of inoculation methods on the composting efficiency of municipal solid wastes. *Chemosphere*, 88(6), 744–750. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.04.032>
- Yu, K., Sun, X., Li, S., Cai, L., Zhang, P., Kang, Y., Yu, Z., Tong, J., & Wang, L. (2018). Application of quadratic regression orthogonal design to develop a composite inoculum for promoting lignocellulose degradation during green waste composting. *Waste Management*, 79, 443–453. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.018>
- Zhang, L., & Sun, X. (2017). Addition of fish pond sediment and rock phosphate enhances the composting of green waste. *Bioresource Technology*, 233, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.073>

Zhao, Y., Lu, Q., Wei, Y., Cui, H., Zhang, X., Wang, X., Shan, S., & Wei, Z. (2016). Effect of actinobacteria agent inoculation methods on cellulose degradation during composting based on redundancy analysis. *Bioresource Technology*, 219, 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.117>