

Revisión sistemática de la literatura sobre el efecto de la aplicación de inóculos microbianos en procesos de compostaje de residuos lignocelulósicos

Stephany Carolina Contreras Castro

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Química

Directora:

Viviana Sánchez Torres

Ingeniera Química, PhD

Codirector:

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ingeniero Civil, PhD

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga

2024

## Contenido

	Pag
Introducción .....	10
1. Marco conceptual .....	11
<b>1.1. Compostaje .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2. Fase termófila .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3. Fase mesófila o de enfriamiento.....</b>	<b>12</b>
<b>1.4. Fase de maduración .....</b>	<b>13</b>
<b>1.5. Variables fisicoquímicas del proceso de compostaje .....</b>	<b>13</b>
1.5.1 Temperatura.....	13
1.5.2 pH. ....	14
1.5.3 Relación C/N.....	14
1.5.4 Humedad .....	14
<b>1.6. Productos finales del compostaje.....</b>	<b>14</b>
1.6.1 Características del compost.....	14
<b>1.7. Material lignocelulósico.....</b>	<b>15</b>
1.7.1 Celulosa .....	15
1.7.2 Hemicelulosa .....	16
1.7.3 Lignina .....	16
2. Objetivos .....	17
<b>2.1. Objetivo general .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>17</b>
3. Descripción metodológica .....	18
<b>3.1. Compilación y selección de artículos científicos encontrados en bases de datos electrónicas .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2. Organización y análisis de los artículos seleccionados: .....</b>	<b>19</b>
3.2.1 Primer filtro: Por título .....	19
3.2.2 Segundo filtro: Por resumen .....	19
<b>3.3. Presentación de resultados .....</b>	<b>20</b>
4. Resultados .....	20
<b>4.1. Resultados de la búsqueda y selección de artículos .....</b>	<b>20</b>
<b>4.2. Análisis de las redes bibliométricas.....</b>	<b>21</b>
4.2.1 Tipo y cultivo de inóculos.....	24
4.2.2 Degradación de lignocelulosa y tiempo del proceso.....	30
4.2.3 Temperatura.....	32
4.2.4 pH.....	33
4.2.5 Humedad .....	34
4.2.6 Relación C/N.....	35
5. Conclusiones .....	38
Referencias bibliográficas.....	39
Apéndices.....	49

### **Dedicatoria**

*En primer lugar, dedico este trabajo a Dios, mi compañero de luchas y mi guía en este largo camino para ser profesional en la carrera que me cautivó desde que inicié a estudiarla.*

*Dedico este trabajo y todo lo que significa este logro a mi señora madre, que no desfalleció, ni perdió la esperanza en mí y en mis capacidades.*

*A mis hermanas y sobrina, que desde la distancia han sido un gran ejemplo y apoyo, gracias por su tiempo, sus consejos, sus correcciones de estilo y por creer en mí, en que si lo lograría.*

*Lo dedico también a mi compañera de vida, a ti mi Patito hermosa; porque has sido un apoyo infinito, porque creíste en mí y sin importar los obstáculos, las duras, y no tan buenas, has apoyado mi sueño de poder graduarme*

*A mi querido profesor Carlos Cruz, que vio en mi grandes capacidades y potencial, que fue mi padre en el comienzo de este largo camino.*

*Esto es de ustedes, de mi familia.*

### Agradecimientos

*En estos largos años de lucha, de persistencia y de trabajo duro, Dios puso en mi camino a infinidad de ángeles, que me brindaron su apoyo, su guía, sus palabras, su tiempo, incluso en ocasiones su propia casa y comida.*

*Agradezco incansablemente a mi señora madre, Amparo Castro, por su comprensión, paciencia y ayuda inagotable. A mis hermanas Cristina y Catalina y a mi sobrina Ale, por ser mis ejemplos profesionales. Gracias a ustedes por creer en mí y apoyarme siempre, sé que esta lucha no ha sido fácil, pero con ustedes a mi lado, es más llevadera.*

*Agradezco enormemente a mis amigas de la universidad y de la vida, mujeres valientes, guerreras y amorosas, que me brindaron su mano y me acompañaron en este largo proceso, no solo en lo académico, sino en lo personal; porque gracias a ustedes después de cada caída me pude levantar y seguir.*

*Gracias infinitas a Cielo Plata, mi amiga del corazón, gracias por soñar, luchar y trasnochar a mi lado, por tu paciencia y sabiduría, que aun después de la universidad y la distancia siguen presentes.*

*Gracias a Camila Pineda, gran ingeniera y colega ejemplar, gracias mujer valiente por enseñarme a luchar y no rendirme a la primera.*

*Gracias a Yurley Correa, otra colega luchadora, gracias inge por tu valiosa amistad y entrega, gracias por enseñarme a buscar siempre la felicidad.*

*Gracias a cada uno de mis compañeros de clase por darme la oportunidad de aprender a su lado, los tengo siempre presentes.*

*Gracias a mis amigas-hermanas que desde el colegio crecieron conmigo, han sido mi apoyo y motivación constante. Gracias Clara Rojas por recordarme el sueño de ser una gran investigadora y no abandonar mi carrera. Gracias Yuliana Velásquez, por nunca soltar mi mano y sacarme de las tristezas profundas para enfocarme de nuevo en este sueño de ser profesional.*

*Gracias a mi gran amiga a la distancia, gracias Lau por tu apoyo, tus palabras y tu perseverante actitud positiva para la vida.*

*Gracias a esos amores del camino que me hicieron fuerte, que me ayudaron a crecer y ser mejor persona, gracias por su ayuda en este proceso.*

*Gracias a mis compañeras de trabajo de estos últimos años, que vieron en mí, su sueño de ser profesionales, porque sin sus palabras y motivación no hubiera podido cumplir este sueño, que también es de ustedes. ¡Lo logramos!*

*Gracias a mi familia del Socorro, a la familia Leal Pico, que me abrieron las puertas de su casa en uno de los momentos más difíciles de mi vida, gracias por su amor, apoyo y presencia, por creer en mí y ayudarme a cumplir este sueño. Gracias a mi segunda mamita, a la señora Ruth, por hacerme sentir especial y querida.*

*Gracias al pueblito viejo, al Socorro, por ser el lugar de grandes aprendizajes, de penas y batallas diarias, pero también de hermosos recuerdos, ahora inolvidables, gracias por darme la oportunidad de comenzar mi camino como Ingeniera Química.*

*Por último, pero no menos importante, agradezco a mi directora de trabajo de grado, Viviana Sánchez, a quien admiro enormemente por su gran trayectoria como investigadora, su conocimiento y su labor docente; además por su perseverancia y por creer en este proyecto, que sin importar el tiempo que demoré en terminarlo, siempre estuvo presente, pendiente, brindándome herramientas para poder culminarlo con éxito y comprendiendo mis dificultades de salud y económicas. Mil gracias profe Viviana por creer en mí.*

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Tipo de residuo, inóculo usado, preparación y dosificación en el proceso de compostaje.</i> .....	25
<b>Tabla 2.</b> <i>Inóculo utilizado, porcentaje de degradación de material lignocelulósico y tiempo total del proceso de compostaje.</i> .....	30
<b>Tabla 3.</b> <i>Métodos de ajuste de la relación C/N inicial.</i> .....	36
<b>Tabla 4.</b> <i>Relación C/N al final del proceso de compostaje.</i> .....	37

**Lista de figuras**

<b>Figura 1.</b> <i>Fases del proceso de compostaje.</i> .....	12
<b>Figura 2.</b> <i>Parámetros para caracterizar en un abono orgánico.</i> .....	15
<b>Figura 3.</b> <i>Metodología desarrollada en la revisión sistemática.</i> .....	18
<b>Figura 4.</b> <i>Esquema del proceso de filtrado y selección</i> .....	21
<b>Figura 5.</b> <i>Artículos publicados por año relacionado con la adición de inóculos al compostaje de residuos lignocelulósicos.</i> .....	22
<b>Figura 6.</b> <i>Porcentaje de publicaciones totales desde 2010 – 2024.</i> .....	22
<b>Figura 7.</b> <i>Red bibliométrica de palabras clave en el periodo de 2010 a 2024</i> .....	23

**Lista de apéndices**

**Apéndice A.** *Ecuaciones y resultados de búsqueda en bases de datos.*

49

## Resumen

**Título:** Revisión sistemática de la literatura sobre el efecto de la aplicación de inóculos microbianos en procesos de compostaje de residuos lignocelulósicos<sup>1</sup>

**Autor:** Stephany Carolina Contreras Castro<sup>2</sup>

**Palabras claves:** Compostaje, consorcio microbiano, inóculos microbianos, residuos lignocelulósicos.

**Descripción:** La generación mundial de grandes cantidades de residuos lignocelulósicos y su dificultad de degradación, debido a su composición (lignina, celulosa y hemicelulosa); lleva a buscar estrategias para su aprovechamiento y obtención de productos de calidad; entre estas, se encuentra el compostaje, que, al ser un proceso de bajo costo, también permite reducir notablemente el volumen de estos residuos. En su optimización, se busca disminuir el tiempo total del proceso, esto se ha logrado con la inoculación de microorganismos nativos y externos; por ello, el presente trabajo tiene como objetivo principal, analizar el efecto de la aplicación de inóculos microbianos en procesos de compostaje de residuos lignocelulósicos, mediante una revisión sistemática de literatura, para identificar los inóculos aplicados, describir su preparación, su dosificación y determinar su efecto sobre las variables fisicoquímicas del proceso.

Para llevar a cabo esta revisión, se estableció un periodo de 14 años; iniciando con 363 investigaciones y por medio de filtros (título, resumen y palabras clave), finalmente se seleccionaron 57 artículos para su análisis. Como resultado, se encuentran los hongos de género: *Penicillium*, *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Thermoascus*, *Coprinus*, *Rhizopus*, *Lentinus*, *Pleurotus*, *Polyporus*, *Trametes* y *Geotrichium*; y las bacterias de género: *Nitrobacter*, *Thiobacillus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Micromonospora*, *Aeromonas*, *Actinomyces*, *Shinella*, *Thermoactinomyces*, *Streptomyces*, *Saccharomonospora*, *Rhizobium*, y *Corynebacterium*, como los inóculos utilizados en los procesos de compostaje y entre sus medios de cultivo comunes: Luria Bertani (LB), extracto de malta, bentonita y agar papa dextrosa (PDA).

Entre los resultados destacados, se encuentran que, los consorcios microbianos (hongo-bacteria) alcanzan un 70% más de degradación del material lignocelulósico en menor tiempo; es decir, se obtiene mayor degradación de lignocelulosa en los procesos inoculados con un tiempo de duración total de 40-60 días. Siendo entonces la inoculación de microorganismos, una estrategia viable para la optimización del proceso de compostaje de residuos lignocelulósicos.

---

<sup>1</sup>Trabajo de grado

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Viviana Sánchez Torres, Ingeniera Química, PhD. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña., Ingeniero Civil, PhD.

### Abstract

**Title:** Systematic review of the literature on the effect of the application of microbial inoculums in lignocellulosic waste composting processes.<sup>3</sup>

**Author:** Stephany Carolina Contreras Castro<sup>4</sup>

**Key words:** Composting, microbial consortium, microbial inoculums, lignocellulosic wastes.

**Description:** The worldwide generation of large quantities of lignocellulosic wastes and their difficulty of degradation, due to their composition (lignin, cellulose and hemicellulose); leads to search for strategies for their use and obtaining quality products; among these, composting is found, which, being a low cost process, also allows to reduce notably the volume of these wastes. In its optimization, it is sought to reduce the total time of the process, this has been achieved with the inoculation of native and external microorganisms; therefore, the main objective of this work is to analyze the effect of the application of microbial inoculants in lignocellulosic waste composting processes, through a systematic review of literature, to identify the inoculants applied, describe their preparation, their dosage and determine their effect on the physicochemical variables of the process.

To carry out this review, a period of 14 years was established; starting with 363 investigations and by means of filters (title, abstract and key words), finally 57 articles were selected for analysis. As a result, fungi of genus: *Penicillium*, *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Thermoascus*, *Coprinus*, *Rhizopus*, *Lentinus*, *Pleurotus*, *Polyporus*, *Trametes* and *Geotrichium*; and bacteria of genus: *Nitrobacter*, *Thiobacillus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Micromonospora*, *Aeromonas*, *Actinomyces*, *Shinella*, *Thermoactinomyces*, *Streptomyces*, *Saccharomonospora*, *Rhizobium*, and *Corynebacterium*, as the inocula used in composting processes and among their common culture media: Luria Bertani (LB), malt extract, bentonite and potato dextrose agar (PDA).

Among the outstanding results are that the microbial consortia (fungus-bacteria) achieve 70% more degradation of the lignocellulosic material in less time; that is, greater lignocellulose degradation is obtained in the inoculated processes with a total duration time of 40-60 days. Therefore, the inoculation of microorganisms is a viable strategy for the optimization of the lignocellulosic waste composting process.

---

<sup>3</sup>Trabajo de grado

<sup>4</sup>Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Viviana Sánchez Torres, Ingeniera Química, PhD. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña., Ingeniero Civil, PhD.

## Introducción

A escala global, la generación de grandes cantidades de residuos orgánicos plantea la necesidad de desarrollar estrategias para su tratamiento debido a que el impacto ambiental es un asunto de gran preocupación a nivel mundial (Bardales et al., 2015). Dentro de los residuos orgánicos, están los residuos lignocelulósicos como lo son los residuos agrícolas; en Colombia, se tiene una alta producción de estos residuos, siendo un 53,2 % los residuos orgánicos aprovechables. (Díaz et al., 2022).

Como técnica de aprovechamiento de este tipo de residuos se encuentra el compostaje, siendo este un proceso que proporciona la posibilidad de transformar, de una manera segura, los residuos lignocelulósicos en insumos para la producción agrícola (Roman et al., 2013); pues, este proceso consiste en la transformación aerobia de la materia orgánica por parte de diferentes tipos de agentes microbianos como bacterias y hongos, con el fin de obtener un producto estable y rico en sustancias húmicas. (Bohórquez, 2019)

Es importante realizar una revisión sistemática de la literatura que aborde las metodologías utilizadas y los resultados obtenidos en la optimización del proceso de compostaje de residuos lignocelulósicos al adicionar inóculos microbianos, dado que la información generada se convierte en soporte esencial y herramienta metodológica para los proyectos de investigación llevados a cabo por el Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos y el grupo de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental, relacionados con el mejoramiento del compostaje de residuos verdes.

A partir de lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es el efecto de la aplicación de inóculos microbianos en procesos de compostaje de residuos lignocelulósicos?

## **1. Marco conceptual**

### **1.1. Compostaje**

Es un proceso de biodegradación de una mezcla de residuos orgánicos llevada a cabo por comunidades microbianas en condiciones aeróbicas en estado sólido, en donde se transforma la materia orgánica en dióxido de carbono, biomasa, energía térmica y materia orgánica estabilizada rica en sustancias húmicas que puede ser utilizada para el mejoramiento de los suelos (Sepúlveda y Alvarado, 2013). Este proceso se ha convertido, en las últimas décadas, en la alternativa tecnológica más utilizada para la reducción de 40% en peso y 50% en volumen de los materiales orgánicos residuales; además, es amigable con el medio ambiente y se considera de bajo costo (Tortarolo et al., 2008).

Durante el proceso de compostaje se presentan cuatro fases: mesofílica, termofílica, de enfriamiento y maduración, así como se aprecia en la Figura 1. En cada una de las etapas se producen cambios en numerosas propiedades químicas, físicas y biológicas de los materiales orgánicos hasta llegar a la formación de moléculas polimerizadas de naturaleza húmica (Defrieri et al., 2005).

### **1.2. Fase mesófila**

Durante esta fase se incrementa rápidamente la temperatura llegando hasta los 40°C, predominan especies bacterianas con respecto a las fúngicas y se degradan los compuestos orgánicos más simples; hay gran actividad metabólica (transformación de algunos compuestos como azúcares y aminoácidos). Esta fase dura pocos días (entre dos y cinco días). (Barbaro, 2022)

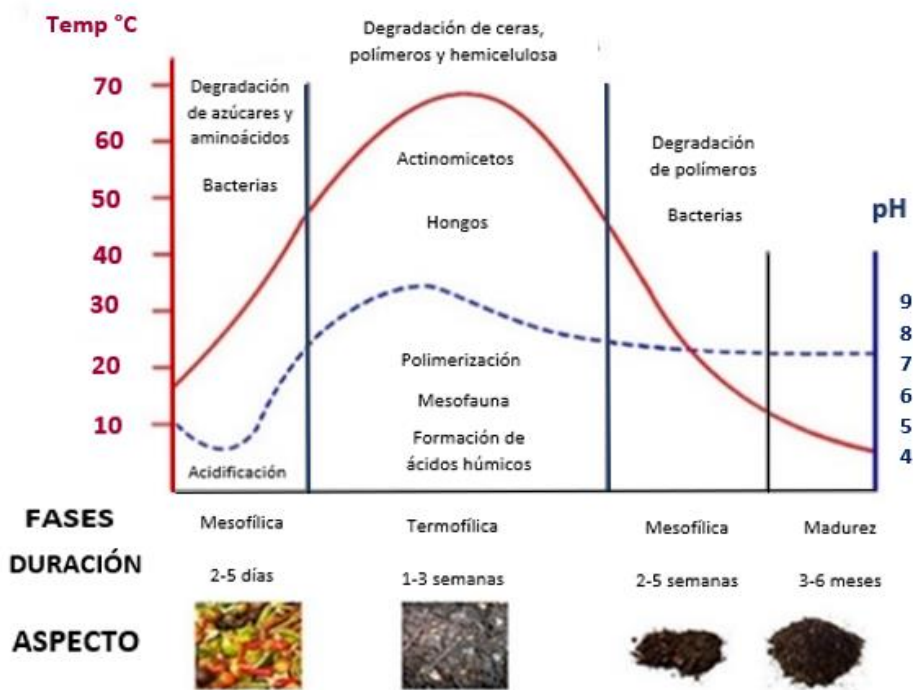
### **1.3. Fase termófila**

Los microorganismos transforman el nitrógeno en amoníaco, haciendo que el pH aumente hasta volverse alcalino; los compuestos lignocelulósicos y ceras se degradan, transformándose en

humus (Sepúlveda y Alvarado, 2013). La temperatura en esta fase está entre los 45 °C y 65 °C; al alcanzar temperaturas por encima a los 60 °C, el calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal, también elimina las esporas de hongos fitopatógenos; esta etapa puede durar entre 1 a 3 semanas. A partir de los 60 °C los hongos termófilos desaparecen y aparecen bacterias esporígenas y actinomicetos, que son los microorganismos encargados de descomponer ceras, proteínas y hemicelulosas (Tortarolo et al., 2008).

**Figura 1.**

*Fases del proceso de compostaje.*



*Nota.* Adaptado de Sepúlveda y Alvarado (2013).

**1.4. Fase mesófila o de enfriamiento**

Se encuentra por debajo de los 45 °C. Este comportamiento sucede debido a que las fuentes de carbono y nitrógeno son escasas, haciendo que los hongos termófilos aparezcan nuevamente y logran descomponer polímeros como la celulosa. El pH desciende levemente manteniéndose

ligeramente alcalino; la duración de esta fase es de 2 a 5 semanas aproximadamente (Sepúlveda y Alvarado, 2013).

### **1.5.Fase de maduración**

Inicia a temperatura ambiente produciendo reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados formando ácidos húmicos y fúlvicos. Esta fase es un periodo de fermentación lenta en la cual la temperatura va disminuyendo lentamente y puede tener una duración de 3 a 6 meses, disminuyendo el consumo de oxígeno y la fitotoxicidad del compost se mantiene controlada (Sepúlveda y Alvarado, 2013).

### **1.6. Variables fisicoquímicas del proceso de compostaje**

La medición de la evolución de los principales parámetros químicos y biológicos permite monitorear el grado de estabilidad alcanzado por los residuos orgánicos y determinar el tiempo óptimo de tratamiento (Defrieri et al., 2005). Por ello, es importante tener en cuenta los siguientes parámetros químicos para conocer el cambio que se genera en el proceso de compostaje al utilizar un inóculo microbiano.

#### **1.6.1 Temperatura.**

La temperatura es uno de los factores cruciales que condicionan las reacciones bioquímicas de las células de los organismos. A medida que aumenta la temperatura, los procesos metabólicos se aceleran y la velocidad de la descomposición de la materia orgánica es afectada de manera directa hasta alcanzar un punto crítico, en el cual el proceso disminuye (Bohórquez, 2019).

### **1.6.2 pH.**

El nivel de acidez o alcalinidad que se da en el proceso de compostaje es esencial, pues influye en las reacciones bioquímicas de los microorganismos. Si bien el proceso tiene lugar en un amplio rango de valores de pH, se considera que los valores adecuados para la mezcla de partida se encuentran en el rango entre 5,5 y 8,0 (Docampo Roberto, 2013).

### **1.6.3 Relación C/N.**

Son muchos los elementos necesarios para la descomposición microbiana, pero el carbono (C) y el nitrógeno (N) son los más importantes. La relación inicial de partida que se recomienda es de alrededor de 30:1. Para proporcionar las cantidades óptimas de ambos elementos es necesario conocer su relación en cada uno de los materiales que se emplearán como materias primas para el proceso. A medida que se produce el compostaje, la relación C/N disminuye gradualmente desde 30:1 a entre 10 y 15:1 para el producto terminado. (Docampo Roberto, 2013).

### **1.6.4 Humedad**

La humedad óptima para el compost se sitúa entre el 45% y 60% y es necesaria para la reproducción correcta de los microorganismos que van a realizar la descomposición (Bohórquez, 2019).

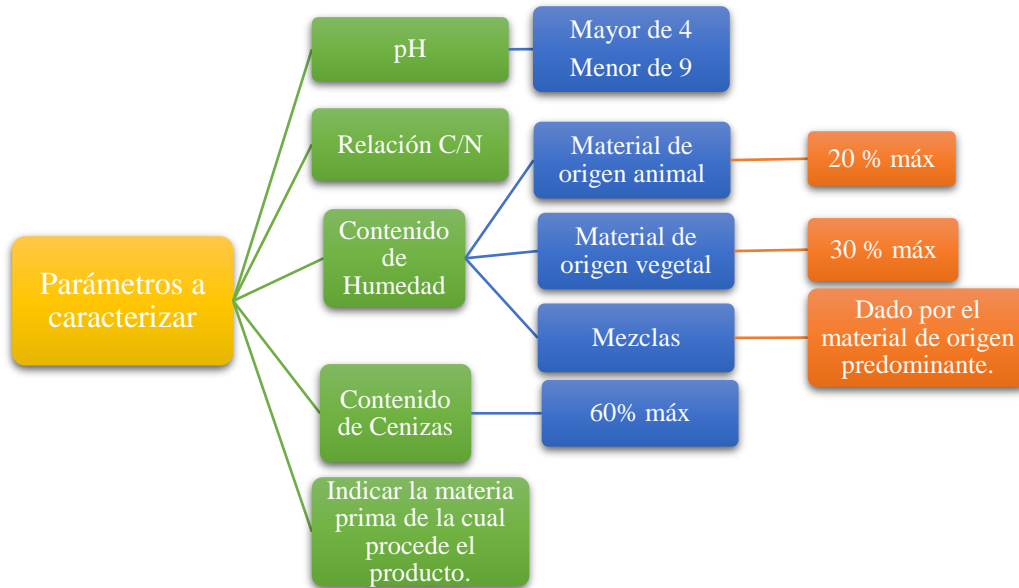
### **1.6.5 Características del compost**

Entre los productos finales del proceso de compostaje y según la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 de 2004, se clasifica el producto final del proceso de compostaje de residuos

lignocelulósicos como compost maduro, con algunos parámetros a caracterizar mostrados en la Figura 2

**Figura 2.**

*Parámetros para caracterizar en un abono orgánico.*



### 1.7. Material lignocelulósico

Es el material orgánico más abundante en la tierra y engloba una gran cantidad de residuos que proceden de muy diversas actividades, tanto industriales como de otro tipo. Se puede considerar como material lignocelulósico: los restos de podas, parte de los restos orgánicos producidos en los hogares, residuos de cosechas, cultivos agrícolas, residuos de la industria de la madera y del papel (Abril & Navarro, 2012). El material lignocelulósico consiste en tres tipos diferentes de polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina. (Cortés-Ortiz, 2013).

#### 1.7.1 Celulosa

La celulosa es el componente fundamental de la pared de las células vegetales porque forma los vasos del floema y xilema, además de constituir el esqueleto de sostén de los tallos, ramas y

troncos de arbustos y árboles. La celulosa forma fibras que están cementadas por compuestos amorfos, hemicelulosas, pectinas y lignina (Piaún-Chavez, 2018).

### **1.7.2 Hemicelulosa**

La hemicelulosa es una estructura compleja de carbohidratos que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa y arabinosa (pentosas), manosa, glucosa y galactosa (hexosas) y ácidos de azúcar. La hemicelulosa tiene un peso molecular más bajo que la celulosa y posee cadenas laterales cortas que constan de diferentes polímeros de azúcares fáciles de hidrolizar. La hemicelulosa sirve como una conexión entre la lignina y las fibras de celulosa, y le da al conjunto de celulosa-hemicelulosa- lignina rigidez (Cortés-Ortiz, 2011).

### **1.7.3 Lignina**

La lignina es uno de los polímeros más abundantes en la naturaleza y está presente en la pared celular. El objetivo principal de la lignina es dar a la planta el soporte estructural, impermeabilidad, y la resistencia contra el ataque microbiano y el estrés oxidativo. Es insoluble en agua y se considera ópticamente inactiva, lo que hace que la degradación de la lignina sea muy difícil (Cortés-Ortiz, 2011).

La lignina posee una gran variedad de enlaces muchos de estos de tipo carbono – carbono, enlaces de tipo éter y gran cantidad de grupos voluminosos, como el fenil (Cardozo-Muñoz y Melo-Chinchilla, 2017).

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

-Analizar el efecto de la aplicación de inóculos microbianos en procesos de compostaje de residuos lignocelulósicos, mediante una revisión sistemática de literatura.

### **2.2. Objetivos específicos**

-Identificar los inóculos que han sido aplicados en procesos de compostaje de residuos lignocelulósicos en un periodo de tiempo de 14 años.

-Describir la preparación del inóculo (medio, temperatura, tiempo) y dosificación en el proceso de compostaje de residuos lignocelulósicos.

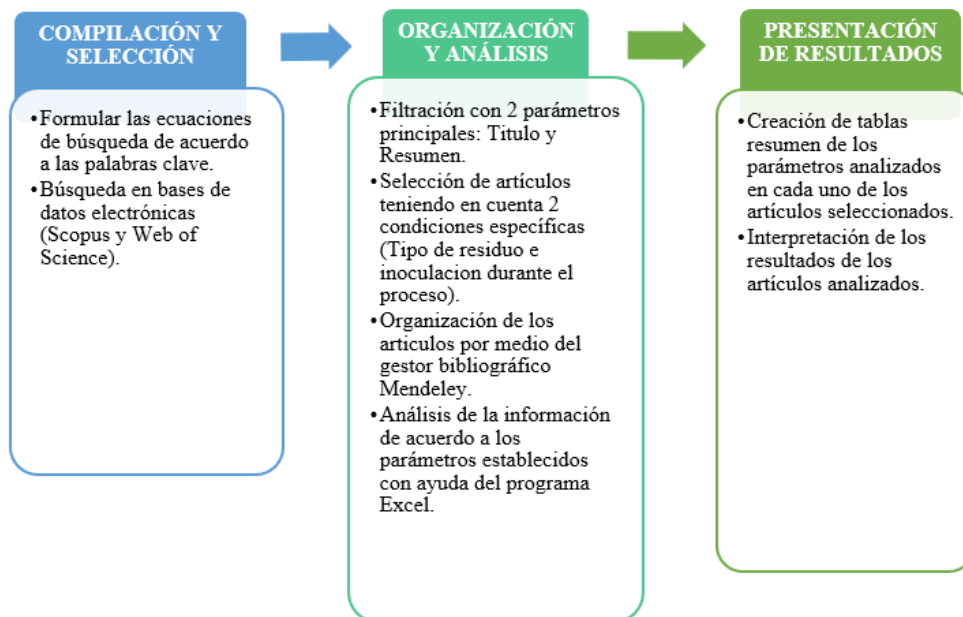
-Determinar el efecto de los inóculos microbianos aplicados sobre las variables fisicoquímicas del proceso de compostaje de residuos lignocelulósicos.

### 3. Descripción metodológica

En el desarrollo de esta revisión sistemática, se tuvieron en cuenta tres fases: i) Compilación y selección de artículos científicos encontrados en bases de datos electrónicas; ii) organización y análisis de los artículos seleccionados y iii) presentación de resultados; tal y como se muestra a continuación en la Figura 3.

#### Figura 3.

Metodología desarrollada en la revisión sistemática.



#### 3.1. Compilación y selección de artículos científicos encontrados en bases de datos electrónicas

La búsqueda se realizó en las bases de datos *Scopus* y *Web of Science*, donde se tuvieron en cuenta parámetros específicos para su selección y estudio, tales como: degradación de lignina, uso de inóculos microbianos en el proceso de compostaje y que el principal residuo a compostar fuera de origen lignocelulósico. Para ello, se escogieron dos palabras (“*composting*” e “*inoculum*”) y un

término clave (“*lignocellulosic waste*”). Las ecuaciones de búsqueda y el número de artículos encontrados se encuentran en el Apéndice 1.

### **3.2. Organización y análisis de los artículos seleccionados:**

En la organización de los artículos encontrados en las bases de datos electrónicas, se tuvo en cuenta.

#### **3.2.1 Primer filtro: Por título y resumen**

Se escogieron artículos que cumplieran con los siguientes parámetros:

- ✓ Tuvieran alguna de las palabras, términos clave o raíces usados en la búsqueda avanzada, tales como: “*composting*”, “*inoculum*”, “*lignocellulosic waste*”, “*inocu*” y “*ligno*”.
- ✓ Desarrollo de un proceso de compostaje con adición de un inóculo microbiano.
- ✓ El tipo de residuo a compostar fuera un residuo lignocelulósico.

#### **3.2.2 Segundo filtro: Por análisis del resumen**

Al pasar el primer filtro, se revisaron los resúmenes de los artículos para buscar información acerca de los parámetros planteados en los objetivos específicos.

Los artículos se cargaron en el gestor bibliográfico *Mendeley*, para su organización y posterior obtención de datos como autores, año de publicación, revista de publicación, resumen y DOI, que después se utilizaron para la creación de una base de datos en *Excel*. Allí, se incluyeron datos más específicos de cada estudio como el porcentaje de degradación de lignina alcanzado al finalizar el proceso con la adición de un inóculo microbiano, tipo de inóculo utilizado, su cultivo, cambios en los parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, relación C/N y humedad) y el tipo de residuos utilizado en cada proceso de compostaje.

### **3.3. Presentación de resultados**

La presentación de los resultados, los cambios del proceso de compostaje y los efectos de la adición de un inóculo microbiano, en los parámetros mencionados anteriormente, se realizó en tablas resumen.

Además de un análisis de cada parámetro seleccionado del proceso de compostaje, de los inóculos microbianos agregados al proceso, su cultivo, la degradación de material lignocelulósico. Y por medio de *VOS Viewer 1.6*, un software libre, se realizó una red bibliométrica para analizar el comportamiento de las investigaciones durante un periodo de estudio de 14 años.

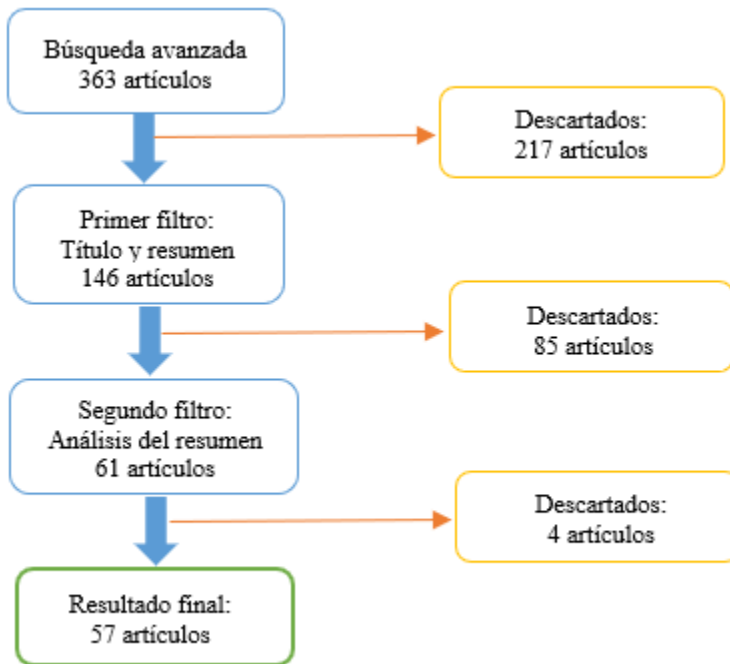
## **4. Resultados**

### **4.1. Resultados de la búsqueda y selección de artículos**

En el proceso de búsqueda de artículos en las bases de datos electrónicas se obtuvieron 363 artículos de los cuales, luego de aplicar los filtros especificados, quedaron 61 artículos. Al buscar los respectivos artículos para analizar, se obtuvo finalmente 57 artículos para el desarrollo de la respectiva revisión sistemática, como se muestra en la Figura 4.

**Figura 4.**

Esquema del proceso de filtrado y selección



#### 4.2. Análisis de las redes bibliométricas

Al analizar un rango de 14 años de publicaciones (2010 - 2024), se puede observar en la Figura 5 un aumento después del año 2013 en la cantidad de artículos publicados por año, siendo el 2019 uno de los años con mayor cantidad de artículos publicados (6 artículos por año); luego, se presenta un pico de aumento en la cantidad de artículos publicados en el 2023 (10 artículos por año), siendo este el año con el mayor número de publicaciones referentes al tema de estudio, en el periodo de tiempo seleccionado.

**Figura 5.**

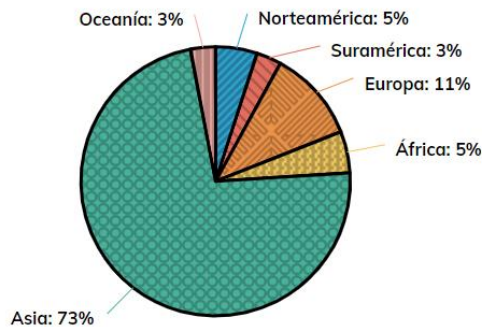
*Artículos publicados por año relacionado con la adición de inóculos al compostaje de residuos lignocelulósicos.*



Un 73% de los estudios revisados, se llevaron a cabo en el continente asiático, en especial en países como China, Indonesia y Malasia, como se muestra en la Figura 6

**Figura 6**

*Porcentaje de publicaciones totales desde 2010-2024*



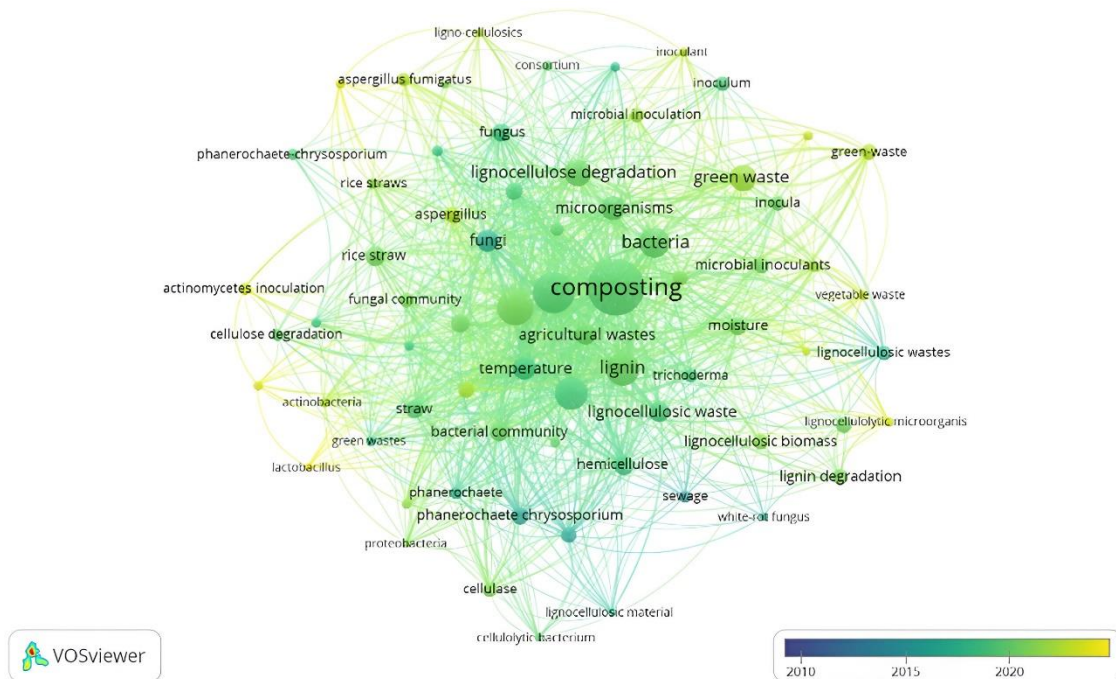
China produce anualmente alrededor de 14 millones de toneladas de residuos lignocelulósicos (Gong et al., 2017) y entre las prácticas más utilizadas para su eliminación se encuentran la incineración y depósito en vertederos a cielo abierto, lo que genera problemas ambientales al aumentar los gases de invernadero y contaminación de suelos y aguas subterráneas (Xu et al., 2016).

Por ello, los tratamientos utilizados buscan reducir el volumen, el peso y recuperar subproductos; una práctica común es la transformación a través del compostaje (Sáez y Urdaneta,

2014), siendo esta una de las opciones con mayor aplicación, gracias a aspectos como el bajo costo y la sencillez del proceso (Oviedo-Ocaña et al., 2017).

### Figura 7

Red bibliométrica de palabras clave en el periodo de 2010 a 2024



Por medio de *VOS Viewer 1.6*, se realizó una red bibliométrica (Figura 7), teniendo en cuenta 2916 palabras claves de los artículos analizados; seleccionando 73 palabras clave (ítems) con un mínimo de 7 concurrencias. La escala muestra el periodo de tiempo donde se da la mayor concurrencia de palabras clave, siendo este del año 2015 al 2020.

Se observa como el foco principal de estudio, es el proceso de compostaje (*Composting-Nodo verde*) y entre los nodos cercanos se encuentran: inoculación (*inoculation*), residuos de agricultura (*agricultural wastes*) y lignina (*lignin*). A su vez, se aprecia el aumento de estudios relacionados con estas palabras clave después del año 2015; posteriormente, aparecen estudios

afines con residuos verdes (*green waste*) y residuos lignocelulósicos (*lignocellulosic wastes*) cerca al año 2020.

Contiguo al nodo de inoculación, se muestran dos reinos de relevancia asociados a *Composting (Nodo verde central)*, que son: *fungi* y *bacteria*; además de los diferentes microorganismos usados en procesos de compostaje de estudios pertenecientes al lapso de tiempo mencionado anteriormente; entre ellos se observan: *Phanerochaete chrysosporium*, *Aspergillus fumigatus*, *actinobacteria*, *actinomycetes*, *Lactobacillus*, *proteobacteria*, *White-rot fungus*, *Trichoderma* y *cellulolytic bacterium*.

También se encuentran los términos clave: *consortium*, *fungal community* y *bacterial community*, alrededor de los nodos de los microorganismos y los diferentes tipos de residuos usados en los procesos de compostaje.

#### **4.2.1 Tipo y cultivo de inóculos**

Uno de los objetivos de esta revisión es, identificar el tipo de microorganismo empleado como inóculo en el compostaje, su forma de cultivo y los residuos a degradar, tal y como se aprecia en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Tipo de residuo, inóculo utilizado, preparación y dosificación en el proceso de compostaje.*

Referencia	Tipo de residuo	Inóculo utilizado	Preparación y dosificación del inóculo
(Nair et al, 2010)	Residuos orgánicos domésticos (Residuos de cocina, papel recortes de hierba y material compostado)	Bacterias EM [agente comercial de siembra microbiana] y hongo <i>Trichoderma sp</i>	<p><b>Medio de cultivo:</b>                      -Para bacterias EM: Se preparó según instrucciones del fabricante, 500 ml de cultivo se mezclaron con 500 ml de agua destilada estéril.                      -Para <i>Trichoderma sp.</i>: Agar papa dextrosa.</p> <p><b>Dosificación:</b>                      1 litro de inóculo se esparció sobre el material en el barril de compost, a los 7, 14 y 21 días.</p>
(H. Y. Wang et al., 2011)	Estiércol vacuno y de pollo. Paja de trigo entre capa y capa de estiércol	<p><b>Hongo:</b>  <i>Penicillium expansum</i></p>	<p><b>Medio de cultivo (sólido):</b>                      Agar papa dextrosa a 4 °C.</p> <p><b>Tiempo de cultivo del inóculo:</b>                      -Micelios y esporas: 3 días a 37 °C.</p> <p><b>Dosificación/ Formulación:</b>                      Se suspenden en agua estéril para alcanzar una concentración de <math>1 * 10^9</math> UFC/ ml. 5 ml/ Kg de suspensión fúngica sobre los montones de la serie 2 y 3, se rociaron sobre cada capa de paja.</p>
(Ghaly et al., 2011)	Residuos de madera tratados con creosata.	<p><b>Hongo:</b>  <i>Thermoascus aurantiacus</i></p>	<p><b>Medio de cultivo (sólido y líquido):</b>                      -Papa dextrosa agar (PDA) para placas inclinadas y de Petri.                      -Caldo de papa dextrosa como medio líquido.</p> <p>La suspensión de esporas se preparó cortando <math>1 \text{ cm}^2</math> de cultivo en placa de Petri en 25 ml de medio de cultivo de agar papa dextrosa estéril e incubado a 45°C por 48 horas hasta llegar a una densidad celular de CFU de <math>2,0 * 10^4 \text{ ml}^{-1}</math></p> <p><b>Dosificación:</b>                      10% (en peso) de cultivo líquido en relación con la masa de la mezcla de compostaje.</p>
(Adebayo et al., 2011)	Residuos de alimentos, recortes de jardín y aserrín.	<p><b>Hongos:</b>                      (<i>Phanerochaete chrysosporium</i>                      - <i>Lentinus tigrinus</i>                      - <i>Aspergillus niger</i> y <i>Penicillium spp</i>)</p>	<p><b>Medio de cultivo:</b>                      Se mantuvieron en placa de agar papa dextrosa (PDA) al 3,7 % p/v, excepto <i>L. tigrinus</i>, que se mantuvo en agar de extracto de malta (MEA) al 4,8% p/v.                      Los hongos se incubaron durante 5 días a 32 °C (excepto <i>L. tigrinus</i> se incubó durante 6 días).</p> <p><b>Dosificación:</b>                      Los recipientes se inocularon con un 6% de esporas fúngicas/ micelios de la totalidad del sustrato con 70% de humedad constituida por (59% agua destilada, 6% de inóculo y 5% de minerales).                      Los tamaños de inóculo utilizados fueron:                      - <i>P. crysporium</i> y <i>L. tigrinus</i>: <math>2,5 * 10^7</math> y <math>5,5 * 10^7</math> esporas por ml.                      - <i>A.niger</i> y <i>Penicillium</i>: <math>84 * 10^6</math> y <math>92 * 10^6</math> UFC/g de inóculo secado al aire.</p>

<b>(Bernal-Vicente et al., 2012)</b>	Residuos de viñedo	<i>Trichoderma harzianum</i>	<p><b>Medio de cultivo:</b> Se inmovilizó en bentonita (siguiendo el protocolo para su inoculación en compost descrito por Bernal-Vicente et al (2009)</p> <p><b>Dosificación:</b> -Inicio del proceso de compostaje: 10<sup>5</sup> CFU/g -Inicio del proceso de maduración (60 días): 10<sup>5</sup> CFU/g.</p>
<b>(Saha et al., 2012)</b>	Paja de arroz, excrementos de aves de corral, salvado y tierra	<p><b>Hongos de la podredumbre blanca</b> :<i>Poly-porus, versicolor(Pv),</i> -<i>Phanerochaete chrysosporium(Pc)</i> y -<i>Pleurotus sajou caju (Psc)</i></p>	<p><b>Medio de cultivo:</b> Masa en salvado de trigo estéril, durante 15 días.</p> <p><b>Dosificación:</b> 18 paquetes se inocularon por separado con 50% de cultivos de compostaje a base de portadores de los respectivos inóculos (0,05% w/w de Psc, Pv y Pc).</p>
<b>(Jurado et al., 2014)</b>	Residuos hortícolas	30 cepas microbianas (incluyendo bacterias y hongos mesófilos y termófilos) previamente aisladas de pilas de compostaje idénticas.	<p><b>Medio de cultivo:</b> -<b>Para bacterias y actinobacterias:</b> Placas de Agar Nutriente (CM0309 Oxoid Ltd., Reino Unido), durante 24 y 72 h. -<b>Para hongos:</b> Placas de Agar Cloranfenicol Rosa de Bengala (CM0549B Oxoid Ltd., Reino Unido), durante 96 h. La temperatura de los cultivos se fijó en 30 °C ó 50 °C, para las cepas mesófilas o termófilas respectivamente.</p> <p><b>Dosificación:</b> 10<sup>6</sup> unidades formadoras de colonias por gramo de residuo (UFC/ g) (para cada cepa en el inóculo). Los inóculos se inyectaron en lugares diferentes de la pila E2 y se inocularon inicialmente 15 cepas.</p>
<b>(Zhang et al., 2014), (Huang et al., 2015), (C. Huang et al., 2017), (Yu et al., 2019)</b>	Residuos agrícolas	<i>Phanerochaete chrysosporium.</i>	<p><b>Medio de cultivo:</b> Agar papa dextrosa, a 4°C, durante 7 días.</p> <p><b>Dosificación:</b> 1% de micelio de <i>P. chrysosporium</i> (peso fresco) 1-2% en peso de suspensiones de esporas</p>
<b>(Zhou et al., 2015)</b>	Estiércol de leche y paja de arroz	<p><b>- Inóculo A:</b> <i>Thermoactinomyces sp.</i></p> <p><b>- Inóculo B (dos hongos en descomposición de la hojarasca):</b> <i>Coprinus cinerea</i> y <i>Coprinus comatus</i></p> <p><b>- Inóculo C (dos hongos degradadores de celulosa):</b> <i>Trichoderma harzianum</i> y <i>Rhizopus oryzae.</i></p>	<p><b>- Inóculo A (<i>Thermoactinomyces sp</i> GF1v GF2):</b> <b>Medio de cultivo:</b> Luria-Bertani <b>Tiempo de cultivo:</b> 3 a 7 días. <b>Temperatura:</b> 55 °C <b>Dosificación:</b> (1:1; densidad de inóculo: 10<sup>7</sup> esporas/g)</p> <p>Inóculo A e incluyendo las esporas de <i>Thermoactinomyces sp.</i> GF1 y <i>Thermoactinomyces sp.</i> GF2</p> <p><b>-Inóculo B (<i>C. cinerea</i> y <i>C. comatu</i>):</b> <b>Medio de cultivo:</b> PDA <b>Tiempo de cultivo:</b> 5 a 7 días. <b>Temperatura:</b> 28 °C <b>Dosificación:</b> (1:1; densidad del inóculo: 0,1 % g/g ) Inóculo B e incluido el micelio de <i>C. cinerea</i> y <i>C. comatus</i>, se inoculó en el reactor de compost después de la fase termófila cuando la temperatura de la pila descendió a 33 °C.</p>

			<p><b>- Inóculo C (<i>T. harzianum</i> y <i>R. oryzae</i>):</b>  <b>Medio de cultivo:</b> PDA <b>Tiempo de cultivo:</b> 5 a 7 días. <b>Temperatura:</b> 28 °C  <b>Dosificación:</b> (1:1; densidad del inóculo: 10<sup>7</sup> esporas/g)                      Inóculo C e incluidas las esporas de <i>T. harzianum</i> y <i>R. oryzae</i> se inoculó en el reactor de compost después de 30 días de fermentación cuando desaparecieron los cuerpos fructíferos de <i>C. cinerea</i> y <i>C. comatus</i>.</p>
		<p><b>-Los *CM desodorizantes:</b>                      Cepas A-03 (bacterias oxidantes del amoníaco), N-24 (<i>Nitrobacter</i>) y D-05 (<i>Thiobacillus</i>)</p>	
		<p><b>-Los *CM de descomposición de la celulosa:</b>                      Cepas X-B1 (<i>Bacillus</i>), X-B7 (<i>Pseudomonas</i>), X-11 (<i>Trichoderma</i>) y X-32 (<i>Trichoderma</i>).</p>	<p><b>Bacterias</b>  <b>Medio de cultivo:</b> Agar Luria-Bertani <b>Tiempo:</b> 24 h</p>
		<p><b>-Los *CM de descomposición de la lignina:</b>                      Cepas M-B1 (<i>Bacillus</i>), M-21 (<i>Trametes</i>) y M-31 (<i>Phanerochaete</i>).  <b>Las cepas X-11, X-32, M-21 y M-31 pertenecían a hongos, las demás eran bacterias.</b>  <b>*Microorganismos compuestos (CM)</b></p>	<p><b>Hongos</b>  <b>Medio de cultivo:</b> Agar papa dextrosa <b>Tiempo:</b> 48 h</p>
(Song et al., 2016)	Residuo de Biogás, estiércol animal (porcino-pollo) y paja de maíz.		<p><b>Dosificación:</b>                      En el tratamiento (compostaje inoculado), cada cepa se añadió a la pila de compostaje a un nivel de 1,25 ml/ kg- de BSCM* seco, y las concentraciones de las cepas fueron de aproximadamente 1 * 10<sup>8</sup> UFC / ml.  <b>*BR (residuo de biogás), SM (estiércol de cerdo), CM (estiércol de pollo) y MS (paja de maíz) (BSCM).</b></p>
		<p><b>Descomponedores de lignocelulosa (DN-1):</b>  <i>Phanerochaete chrysosporium</i> (se aisló del suelo de la provincia china de Heilongjiang), <i>Streptomyces griseorubens</i> (C-5), <i>Bacillus subtilis</i> (W1), <i>Bacillus methylotrophicus</i> (W8) y <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> (X9).                      W1, W8 y X9 se aislaron a partir de estiércol fresco de vacuno.</p>	
(Xu et al., 2016)	Estiércol bovino y paja de arroz		<p><b>Formulación:</b>                      La suspensión de los inoculantes: 13 * 10<sup>9</sup> UFC/ml.</p> <p><b>Dosificación:</b>                      Se roció uniformemente sobre el sustrato de compostaje a razón de 10 ml de la suspensión frente a 1 kg de compost.</p>
		<p><b>Hongos lignocelulolíticos:</b>  <i>Trametes versicolor</i> y <i>Phanerochaete chrysosporium</i>.</p>	<p><b>Medio de cultivo (Líquido):</b>                      Se cultivaron en matraces Erlenmeyer de 500 ml que contenían 250 ml de caldo de dextrosa de patata modificado (PDB: Agua destilada 1000 ml; patata pelada 200 g; dextrosa 20,0 g; KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3,0 g; MgSO<sub>4</sub> * 7 H<sub>2</sub>O 1,5 g; vitaminas, trazas; pH ajustado a 7,0) y 170 rpm.  <b>Temperatura:</b> 28°C <b>Tiempo:</b> 7 días.</p>
(Gong et al., 2017)	Residuos verdes frescos (Hojas caídas, recortes de césped y podas de árboles)		<p><b>Dosificación:</b>                      Se aplicaron dos veces (día 0 y día 14) añadiendo 20 ml de PDB por kg de residuo seco.</p>

			<p><b>Formulación:</b> Para Tratamiento 1 y Tratamiento 2, el PDB contenía: &gt; 1 * 10<sup>6</sup> UFC/ ml del hongo indicado.</p>
(Fersi et al., 2019)	Residuos verdes con lodos de aguas residuales de almazara y pozos de café.	<p><b>Hongo:</b> <i>Trametes trogii</i></p>	<p><b>Medio de cultivo:</b> Agar extracto de malta (MEA) (19 g/L extracto de malta y 15 g/L agar). Precultivo en medio M7.</p> <p><b>Dosificación:</b> (10 g/kg) en t<sub>0</sub> y en la fase de maduración (t<sub>120</sub>), respectivamente.</p>
(Xu et al., 2019)	Hojas de caña de azúcar y estiércol lácteo.	<p><b>Consortio microbiano termófilo multifuncional (CTMC):</b> Cepa de <i>Bacillus licheniformis</i> (TA65) y dos cepas de <i>Aspergillus nidulans</i> (GXU-1) y <i>Aspergillus oryzae</i> (GXU-11).</p>	<p><b>Cepa de <i>B. licheniformis</i>:</b> <b>Medio de cultivo:</b> Medio LB (triptona 10 g/L, extracto de levadura 5 g/L, NaCl 10 g/L, agar 15 g/L) pH: 7,3-7,5 <b>Tiempo:</b> 3-4 días <b>Temperatura:</b> 50°C</p> <p><b>Cepas de <i>Aspergillus</i>:</b> <b>Medio de cultivo:</b> caldo de dextrosa de patata (PDB) (patata 200 g/L, glucosa 20 g/L) <b>Temperatura:</b> 50 °C <b>Tiempo:</b> 5 días</p> <p><b>Formulación:</b> Los cultivos microbianos se mezclaron entre sí en la proporción 1:1:1 (p/p/p) como inoculantes.</p> <p><b>Dosificación:</b> Se inoculó con inoculantes a un nivel del 2% en peso seco, en dos fases a los 0 y 9 días.</p>
(Wei et al., 2019)	Paja de trigo, arroz, maíz y soja.	<p><b>Actinomicetos termófilos (cepas):</b> -<i>Streptomyces sp.</i> H1 (KX641927.1), -<i>Mycobacterium sp.</i> G1 (KY910181.1), -<i>Micromonospora sp.</i> G7 (LC333394.1) y - <i>Saccharomonospora sp.</i> T9 (NR074713. 2)</p>	<p><b>Formulación:</b> 10<sup>9</sup> UFC / ml</p> <p><b>Dosificación:</b> Se inocularon a un nivel de 3 ml/ kg en proporción de peso seco, en la fase de calentamiento (día 1) y en la fase de enfriamiento (día 8) del compostaje mediante pulverización sobre la mezcla de compostaje</p>
(Irawan et al., 2019)	Hojarasca.	<p><b>Hongos lignocelulolíticos compuesto por 3 aislados:</b> -<i>Aspergillus fumigatus</i> (celulolítico). -<i>A. tubingensis</i> (xilanolítico) y -<i>Geotrichium sp</i> (ligninolítico).</p>	<p><b>Formulación:</b> -<i>Aspergillus fumigatus</i> (9,6 * 10<sup>9</sup>) -<i>A. tubingensis</i> (5,6 * 10<sup>8</sup>) -<i>Geotrichium sp</i> (8,2 * 10<sup>6</sup>)</p> <p><b>Dosificación:</b> 3 aislados A, B y C (celulolítico, xilanolítico y ligninolítico) preparados con 2 combinaciones de aislados emparejados entre sí: AB, AC y BC.</p>
(Y. Wu et al., 2019)	Paja de arroz, paja de maíz y estiércol de cerdo.	<p><b>El MI comercial "agente compuesto de <i>Trichoderma</i>" (CTA):</b> -<i>Trichoderma viride</i> (~50%) y -<i>Trichoderma harzianum</i> (~45%).</p> <p><b>El MI comercial "agente descomponedor de paja" (SDA):</b> <i>Bacillus subtilis</i> (~45%), <i>Bacillus casei</i> (~40%) y <i>Actinomyces bovis</i> (~10%).</p>	<p><b>Dosificación:</b> - "Agente descomponedor de paja" (SDA): El número efectivo de microorganismos viables era de 2 * 10<sup>8</sup> individuos/g. - "Agente compuesto de <i>Trichoderma</i>" (CTA): El número efectivo de microorganismos viables era de 0,5 * 10<sup>8</sup> individuos/g.</p>
(D. Wu et al., 2020)	Paja de arroz	<p><b>Agente bacteriano compuesto: (cribado a partir del compost de paja de arroz):</b> -Mezcla de cinco cepas bacterianas:</p>	<p><b>Medio de cultivo:</b> Las bacterias oxidantes del amoníaco enriquecidas (AOB, que podían oxidar el amoníaco o el amonio en nitrito, se obtuvieron a partir de estiércol de pollo mediante un medio de</p>



#### 4.2.2 Degradación de lignocelulosa y tiempo del proceso

“El proceso de compostaje de materiales de naturaleza lignocelulósica (como hojas, gramaje y virutas de madera) podría tardar hasta 24 meses en madurar si no se emplean estrategias para acelerar los procesos” (Tai y He, 2007).

Por ello, el tiempo del proceso es un indicador importante en la eficacia del mismo y en la calidad del producto final; por ende, se busca un mayor porcentaje de degradación de material lignocelulósico (lignina, celulosa, hemicelulosa) de los residuos verdes, en el menor tiempo posible con la adición de un inóculo microbiano; así como se muestra en la Tabla 2:

**Tabla 2.**

*Inóculo utilizado, porcentaje de degradación de material lignocelulósico y tiempo total del proceso de compostaje.*

Inóculo utilizado	Tipo de residuo	Degradación de material lignocelulósico en pilas inoculadas	Tiempo del proceso (Días)	Referencia
<i>Termo actinomyces sp.</i> <i>Coprinus cinerea</i> y <i>Coprinus comatus</i> <i>Trichoderma harzianum</i> y <i>Rhizopus oryzae.</i> /	Estiércol de leche y paja de arroz	<b><u>Degradación rápida de lignina</u></b> <b><u>(16-30 días):</u></b> 28 % <b><u>Degradación lenta de lignina</u></b> <b><u>(31-45 días):</u></b> 35 %	50	(Zhou et al., 2015)
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> <i>Streptomyces griseorubens</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus methylotrophicus</i> y <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> .	Estiércol bovino y paja de arroz	<b><u>Celulosa:</u></b> 62,57 % <b><u>Hemicelulosa:</u></b> 67,14 % <b><u>Lignina:</u></b> 42,54 %	46	(Xu et al., 2016)
<i>Trametes versicolor</i> y <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Residuos verdes frescos (hojas caídas, recortes de césped y podas de árboles)	<b><u>Lignina:</u></b> <i>Tratamiento 1:</i> 7,1 % <i>Tratamiento 2:</i> 8,2 % <b><u>Celulosa:</u></b> <i>Tratamiento 1:</i> 10,6 % <i>Tratamiento 2:</i> 13,6 %	41	(Gong et al., 2017)
<i>Streptomyces sp.</i> , <i>Mycobacterium sp.</i> , <i>Micromonospora sp.</i> y <i>Saccharomonospora sp.</i>	Paja de trigo, arroz, maíz y soja	<b><u>Celulosa:</u></b> 46,2 % <b><u>Hemicelulosa:</u></b> 28,9 % <b><u>Lignina:</u></b> 22,5 %	60	(Wei et al., 2019)
<i>Trichoderma viride</i> y <i>Trichoderma harzianum</i> . <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus casei</i> y <i>Actinomyces bovis</i> .	Residuos verdes (ramas cortadas con hojas)	<b><u>Celulosa:</u></b> <i>Paja maíz:</i> 15 % <i>Paja arroz:</i> 18 % <b><u>Hemicelulosa:</u></b> <i>Paja maíz:</i> 32 % <i>Paja arroz:</i> 26 %	38	(Y. Wu et al., 2019)

Se observa cómo, con la adición de un inóculo microbiano, el tiempo del proceso se reduce de 4 meses a aproximadamente 2 meses en la mayoría de los estudios analizados, a su vez, se obtiene un alto porcentaje de degradación de material lignocelulósico, en comparación con las pilas sin inocular en los tratamientos realizados en cada estudio.

También se encuentran estudios, en donde el tiempo del proceso se extiende a un rango de 4 - 6 meses, evidenciándose un mayor porcentaje de degradación de material lignocelulósico, tal y como lo muestra Jurado et al., (2014), que con un inóculo conformado por 30 cepas microbianas (bacterias y hongos mesófilos y termófilos), en 136 días de proceso, obtiene un 41 % de degradación de lignina y un 85 % de degradación de hemicelulosa. De igual manera, Fersi et al., (2019), con 180 días (6 meses) de proceso, muestra un aumento de 18%, 15% y 25 % en la degradación de celulosa, en sus respectivas corridas (H1, H2 y H3) y un aumento de 17%, 39 % y 19 % en la degradación de lignina, la cual se llevó a cabo durante los dos últimos meses del proceso.

Se presenta el caso de dos estudios realizados por los mismos autores y con igual duración en el proceso de compostaje (60 días), en el estudio (Yu et al., 2018), se realiza una comparación del porcentaje de degradación de material lignocelulósico en pilas inoculadas con *Phanerochaete chrysosporium*, un inóculo compuesto (*Lactobacillus sp.*, *Saccharomyces sp.*, y *Rhodopseudomonas sp*) y microorganismos eficientes (EM); obteniendo máximos de degradación de lignina de 25,94%, 23,91% y 19,44%, respectivamente; además, un 34,31%, 41,69% y 40,71% de degradación de celulosa en las pilas mencionadas anteriormente. Luego, Yu et al., (2019), emplea solamente *Phanerochaete chrysosporium*, como inóculo, registrando porcentajes de degradación de lignina 25,29% (T1) y 26,26 % (T2) y de celulosa 54,49% (T1) y 53,82 % (T2),

siendo T1 y T2 los tratamientos inoculados en el proceso de compostaje con ciclos estacionales de congelación y descongelación.

### **4.2.3 Temperatura**

Es una de las variables seleccionadas para su estudio en esta revisión sistemática, debido a su relevancia en el proceso de compostaje para diferenciar el inicio y final de las fases del mismo, además “en el proceso de compostaje es una de las variables de mayor importancia, influye desde la mineralización y crecimiento de las poblaciones microbianas y ellas a su vez de las reacciones exotérmicas de descomposición de las cadenas de compuestos orgánicos” (Sepúlveda Villada y Alvarado Torres, 2013).

En los artículos analizados, se llevaron a cabo comparaciones de las variables importantes del proceso, entre estas la temperatura; por medio de pilas o series inoculadas y una de control (sin inóculo); estas, se efectuaron a escala piloto y de laboratorio en biorreactores, como se describe en el estudio de Ghaly et al. (2011) y macetas de plástico por (Adebayo et al., 2011), aunque la mayoría optaron por la construcción de pilas de diferentes formas (cónicas, piramidales, trapezoidales) al aire libre.

En cada uno de los estudios, al adicionar los diferentes inóculos, se observó una temperatura máxima (60 - 70 °C) mayor a la de la serie de control (sin inóculo) (45 °C), lo que reducía el tiempo del proceso; pues al alcanzar en menor tiempo una temperatura máxima, esta llegaba con mayor rapidez a la temperatura ambiente y con ello a la maduración del producto del compostaje, tal y como se evidencia en: Zhou et al., (2015), en donde las pilas de compostaje se inoculan tres veces en diferentes fases del proceso y aumenta la temperatura en cada inoculación, al igual, en el estudio de Xu et al., (2016), se presenta un aumento de temperatura hasta llegar a su valor máximo (72 °C) en menor tiempo (3 días) que el ensayo sin inocular, del mismo modo, Fersi

et al.,(2019); Gong et al., (2017); C. Huang et al., (2017); Wei et al., (2019), reportan un aumento de la temperatura después de inocular cada ensayo, alcanzando su fase termófila en menor tiempo (3-5 días).

Se observa también, como esta variable a través del tiempo se convierte en un indicador del cambio de fase del proceso, en donde, en palabras de Bouhia et al. (2021) “el seguimiento de la temperatura durante todo el proceso de compostaje, reveló dos fases muy diferenciadas (fase termófila y de maduración)” y del momento adecuado para la inoculación de microorganismos aceleradores del mismo; tal y como evidencia Jurado et al, (2014), en donde, gracias al volteo de las pilas, se produce una reactivación térmica alcanzando tres periodos termófilos, aprovechando así los volteos para la inoculación en cada pila del proceso.

#### **4.2.4 pH**

Otra de las variables analizadas en los estudios seleccionados es el pH, pues:

Durante el proceso de compostaje se producen diferentes fenómenos o procesos que hacen variar este parámetro. Al principio el pH desciende; seguidamente, aumenta como consecuencia de la formación de amoníaco, alcanzando el valor más alto, alrededor de 8,5, coincidiendo con el máximo de actividad de la fase termófila. Finalmente, el pH disminuye en la fase final o de maduración (pH entre 7 y 8) debido a las propiedades naturales de amortiguador o tampón de la materia orgánica. (Negro et al., 2000).

Las mezclas iniciales utilizadas en los diferentes estudios analizados son, en su mayoría mezclas con un pH ácido (entre 4-6,5). A medida que avanza el proceso y se realizan las inoculaciones de los microorganismos, se alcanza un pico de acidez en donde se observa la mayor actividad microbiana y posteriormente el pH aumenta lentamente hasta llegar a un valor básico

(entre 7-8,5); tal y como lo evidencia Bouhia et al., (2021) “el pH cambió significativamente y pasó de un valor ácido a uno básico. Al final del proceso de compostaje, el pH de las mezclas aumentó en casi 2 unidades, pasando de 5,5 a 7,7 (E1) y 7,9 (E2).”

También, Fersi et al., (2019), nos muestra como en el proceso de compostaje desarrollado con residuos verdes, lodos de aguas residuales de almazara y pozos de café, hubo dos fases sucesivas: una alcalinización (0-60 días) y una estabilización (60-210 días), en donde, durante la primera fase, el pH aumentó desde los valores iniciales de 6,5-7 hasta llegar a un pH básico de 9.

Además, Chin et al., (2020) menciona que, al agregar las mezclas de microorganismos en los procesos de compostaje, los valores iniciales en las pilas con diferentes combinaciones de microorganismos (*Bacillus subtilis*, *Aspergillus sp.* y *actinobacterias: EM-1*), oscilaron entre 5,72 y 6,94; aumentando el pH al principio del periodo de compostaje y descendiendo ligeramente, alcanzando valores finales entre 6,21 y 7,32.

Sin dejar de lado a Yu et al., (2019) con la adición de vinagre de bambú (compuesto principalmente de ácido acético), que, después de la inoculación, reduce el pH del compost, disminuyendo la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco durante el compostaje.

#### **4.2.5 Humedad**

Se convierte en un factor importante para optimizar en el proceso de compostaje y a su vez es “una variable imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos”. (Bueno Márquez et al., 2008). Por ello, se tiene un valor óptimo entre el 50-70% de humedad; para que ocurra el crecimiento de los microorganismos correctos y necesarios para la obtención de un producto estable; debido a que:

La actividad biológica decrece mucho cuando la humedad está por debajo del 30%; por encima del 70% el agua desplaza al aire en los espacios libres existentes entre las partículas,

reduciendo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis; originando malos olores y disminuyendo la velocidad del proceso. (Bueno Márquez et al., 2008).

Según Bueno Márquez et al., (2008), la humedad óptima de la mezcla depende del tipo de residuo a compostar; es así como en la mayoría de los artículos analizados, en donde se lleva a cabo el proceso de compostaje de mezclas con alto porcentaje de residuos verdes, se utilizan métodos adicionales para lograr y mantener el valor óptimo de la humedad; en especial después de la inoculación; pues se hace un ajuste del valor de humedad, como lo evidencia Adebayo et al., (2011) debido a que, la humedad aumenta después de inocular *Penicillium sp.* en el proceso de compostaje.

El valor más alto de humedad encontrado en los estudios analizados, lo presenta Saha et al., (2012) con un 70 % y el valor más bajo, lo muestra Zhang et al., (2013) con un 55-60 % (Fase I) y 45-50 % (Fase II) en su contenido de humedad durante el proceso de compostaje,

#### **4.2.6 Relación C/N**

Esta relación es relevante en el proceso de compostaje, debido a que:

Dos de los elementos más importantes para el metabolismo microbiano son el carbono y el nitrógeno, debe existir una adecuada relación de estos para que la degradación de los residuos sea eficiente. Se considera que una relación apropiada al inicio del proceso debe ser de 25 a 35. (Negro et al., 2000).

Por ello, la importancia de seleccionar adecuadamente los residuos a compostar, en este caso, su tamaño, según Liu et al., (2018): “se observó una mayor relación C/N en tratamientos con trozos de GW de 2 mm que en los de 5 mm” y según D. Wu et al., (2020) “la paja de arroz se cortó en un tamaño de partícula de 1,5-2,5 cm para mejor compostaje”, esto nos indica que, en

trozos pequeños aumenta la relación de carbono y por tanto se puede demorar su degradación al no hacer contacto directo con los microorganismos degradadores y afectar el producto final; pues, “a medida que transcurre el compostaje, esta relación se hace cada vez menor” (Negro et al., 2000), siendo un valor óptimo para esta relación uno significativamente menor al inicial ( $> 25$ ).

Al realizarse el proceso de compostaje con una mezcla de residuos de diferentes composiciones, es de esperar que la relación C/N inicial varíe y en algunas ocasiones no sea la ideal, así “cuando la relación C/N es elevada se podrá hacer descender artificialmente, ya sea quitando celulosa, es decir, reduciendo el carbono o aumentando el contenido de nitrógeno, por ejemplo, con adición de alguna fuente nitrogenada” (Negro et al., 2000), tal es el caso de algunos estudios donde esta relación se ajustó con otro tipo de sustancias como se muestra en la Tabla 3:

**Tabla 3.**

*Métodos de ajuste de la relación C/N inicial.*

<b>Tipo de residuos</b>	<b>Método de ajuste</b>	<b>Referencia</b>
<b>Desechos agrícolas y forestales (Tallos de maíz, hojas de álamo, malas hierbas, aserrín de álamo.</b>	Se agregó okara para ajustar relación inicial a 30.	S. L. Wang et al., (2014)
<b>Residuos agrícolas.</b>	Se utilizó salvado para ajustar la relación inicial a 30	Huang et al., (2015)
<b>Residuos verdes (ramas con hojas).</b>	Se ajustó a 25 mediante úrea (11,15 g de urea/1 kg de materia prima seca). La úrea se disolvió en 5 L de agua y se roció sobre la pila para luego ser mezclada.	Yu et al., (2018)

Finalmente, en la Tabla 4, se observan estudios en donde la relación C/N, se reduce al final del proceso, como consecuencia de la inoculación de microorganismos descomponedores.

**Tabla 4.**

*Relación C/N al final del proceso de compostaje.*

Tipo de residuos	Relación C/N inicial vs Relación C/N final	Referencia
<b>Residuos orgánicos domésticos (Residuos de cocina, papel recortes de hierba y material compostado).</b>	79,1-23 (Control) 79,1 - 27 (Cultivo de EM-aceleradores del proceso de compostaje) 79,1 - 23 (Inoculación de <i>Trichoderma sp.</i> )	Nair et al., (2010)
<b>Paja de arroz, excrementos de aves de corral, salvado y tierra.</b>	-Compostaje tradicional: 22,3 - 21,1 (Inoculación de <i>Pleurotus sajor caju</i> ) 28 - 26,8 (Inoculación de <i>Poly-porus versicolor</i> ) 17,9 – 16,6 (Inoculación de <i>Phanerochaete chrysosporium</i> ) -Compostaje en dos etapas: 52,05 - 14,7 (Inoculación de <i>Pleurotus sajor caju</i> ) 58,60 - 17,2 (Inoculación de <i>Poly-porus versicolor</i> ) 40,08 – 11,6 (Inoculación de <i>Phanerochaete chrysosporium</i> )	Saha et al., (2012)
<b>Paja de arroz, verduras secas, salvado y tierra tamizada.</b>	30 – 17 (Inoculación de <i>P. chrysosporium</i> )	Zhang et al., (2013)
<b>Desechos agrícolas y forestales (Tallos de maíz, hojas de álamo, malas hierbas, aserrín de álamo).</b>	30 – 17 aprox (Inoculación de <i>Phanerochaete chrysosporium</i> ) 30 – 20 aprox (Inoculación de <i>Coriolus versicolor</i> ) 30 – 18 aprox (Inoculación de Agente desarrollado en laboratorio con alta capacidad de degradación de lignocelulosa)	S. L. Wang et al., (2014)
<b>Estiércol de leche y paja de arroz.</b>	27 – 16,5 (Inoculación en diferentes etapas: - <u>Antes de fermentación:</u> <i>Thermoactinomyces sp.</i> - <u>Después de fase termófila:</u> <i>Coprinus cinerea</i> y <i>Coprinus comatus</i> - <u>Después de 30 días de fermentación:</u> <i>Trichoderma harzianum</i> y <i>Rhizopus oryzae</i> )	Zhou et al., (2015)
<b>Residuos verdes frescos (Hojas caídas, recortes de césped y podas de árboles).</b>	25 – 17,40 (Control) 25 – 14,81 (Inoculación de <i>Trametes versicolor</i> ) 25 – 14,55 (Inoculación de <i>Phanerochaete chrysosporium</i> )	Gong et al., (2017)
<b>Lodos de aguas residuales de almazara (OMS) y residuos verdes (GW): Parte folicular de las plantas y hierba de trabajo de jardinería.</b>	116 – 37 (E1(49% lodos+49% residuos verde+2% de inóculo termófilo)). 118 – 38 (E2 (50% lodos+50% residuos verdes)).	Bouhia et al., (2020)

## 5. Conclusiones

Entre los inóculos microbianos utilizados como estrategia de optimización del proceso de compostaje de residuos lignocelulósicos, se encuentran los hongos de género: *Penicillium*, *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Thermoascus*, *Coprinus*, *Rhizopus*, *Lentinus*, *Pleurotus*, *Polyporus*, *Trametes* y *Geotrichium*; y las bacterias de género: *Nitrobacter*, *Thiobacillus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Micromonospora*, *Aeromonas*, *Actinomyces*, *Shinella*, *Thermoactinomyces*, *Streptomyces*, *Saccharomonospora*, *Rhizobium*, y *Corynebacterium*.

En los procesos de compostaje de residuos lignocelulósicos con mayor porcentaje de degradación de lignina, se utilizaron inóculos de consorcios microbianos (hongos y bacterias).

Para la siembra de bacterias y actinomicetos, el medio empleado comúnmente, es el medio Luria Bertani (LB); en cambio para los diferentes hongos, se usan medios de extracto de malta, bentonita, agar papa dextrosa (PDA) y placas de agar cloranfenicol rosa de bengala.

La inoculación de microorganismos en procesos de compostaje de residuos lignocelulósicos permite aumentar la temperatura del proceso en un menor tiempo, reduciendo la duración total del proceso, aumentando el porcentaje de degradación del material lignocelulósico

**Referencias bibliográficas**

- Abril, A & Navarro, E.A. (2012). *Etanol a partir de biomasa lignocelulósica*. Aleta.
- Adebayo, O. S., Kabbashi, N. A., Alam, M. Z., Salihu, A., Salihu, A., Abass, A., & Ruqayyah, T. I. D. (2011). Composting of food and yard wastes by locally isolated fungal strains. *African Journal of Biotechnology*, 10(81), 18800–18806.
- Barbaro, L. (2022). *Compostaje de residuos orgánicos*. INTA – Estación experimental agropecuaria Cerro Azul. 1-13
- Bardales, C., Rojas, C., & León, C. (2015). Evaluación de los principales residuos lignocelulósicos agroindustriales del departamento de La Libertad, Perú como potenciales materias primas para la obtención de bioetanol. *Arnaldoa*, 22, 225–232.
- Bernal-Vicente, A., Ros, M., & Pascual, J. A. (2012). Inoculation of *Trichoderma Harzianum* during maturation of vineyard waste compost to control muskmelon *Fusarium* wilt. *BioResources*, 7(2), 1948–1960.
- Bohórquez, W. (2019). *El proceso de compostaje*. Universidad de la Salle.
- Bouhia, Y., Lyamlouli, K., Fels, L. El, Youssef, Z., Ouhdouch, Y., & Hafidi, M. (2020). Effect of Microbial Inoculation on Lipid and Phenols Removal During the Co-

composting of Olive Mill Solid Sludge with Green Waste in Bioreactor. *Waste and Biomass Valorization*, 12(3), 1417–1429.

Bueno Márquez, P., Jesús, M., Blanco, D., & Cabrera Capitán, F. (2008). *Compostaje*. Mundi Prensa Libros.

Cardozo Muñoz, J. C., & Melo Chinchilla, M. A. (2017). *Despolimerización de lignina extraída de carbón de bajo rango por el método de la radiación UV/TiO<sub>2</sub> y su uso en la elaboración de madera artificial*. [Tesis de pregrado no publicada, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].

Chin, K. L., H'ng, P. S., Chai, E. W., Khoo, P. S., Lee, C. L., & Go, W. Z. (2020). Valorization of Lignocellulosic Food Industry Waste in Malaysia by Accelerated Co-composting Method: Changes in Physicochemical and Microbial Community. *Waste and Biomass Valorization*, 11(9), 4871–4884.

Cortes Ortiz, W. G. (2011). Materiales lignocelulósicos como fuente de biocombustibles y productos químicos. *Tecno ESUFA*, 16, 41–26.

Cortes Ortiz, W. G. (2013). Tratamientos Aplicables a Materiales Lignocelulósicos para la Obtención de Etanol y Productos Químicos. *Revista de Tecnología*, 13, 39–44.

Defrieri, R. L., Jimenez, M. P., Efron, D., & Palma, M. (2005). Utilización de parámetros químicos y microbiológicos como criterios de madurez durante el proceso de compostaje. *Agriscientia*, 22.

Díaz Alarcón, A. & Cardozo Gutiérrez, A. (2022). *Análisis de la gestión de los residuos orgánicos en Colombia a través de la visualización del marco legal vigente representado por medio de un dashboard*. Universidad de la Salle.

Docampo Roberto. (2013). Compostaje y compost. *Revista INIA* 63. 63–67.

Fersi, M., Mbarki, K., Gargouri, K., Mechichi, T., & Hachicha, R. (2019). Assessment of organic matter biodegradation and physico-chemical parameters variation during co-composting of lignocellulosic wastes with *Trametes trogii* inoculation.

Ghaly, A. E., Zhang, B., & Dave, D. (2011). under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 3.0 license Biodegradation of Phenolic Compounds in Creosote Treated Wood Waste by a Composting Microbial Culture Augmented with the Fungus *Thermoascus aurantiacus*. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 7(2), 90–103.

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.

Huang, C., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Xu, P., Zhang, C., Cheng, M., Wan, J., Hu, L., & Zhang, Y. (2017). Effect of Phanerochaete chrysosporium inoculation on bacterial community and metal stabilization in lead-contaminated agricultural waste composting. *Bioresource Technology*, 243, 294–303.

Huang, H. li, Zeng, G. ming, Luo, L., Zhang, J. chao, Yu, M., & Qin, P. feng. (2015). Effect of inoculation during different phases of agricultural waste composting on spectroscopic characteristics of humic acid. *Journal of Central South University*, 22(11), 4177–4183.

Irawan, B., Septitasari, A. W., Zulkifli, Handayani, T. T., Damsir, & Hadi, S. (2019). Effect of Induced Compost by Cellulolytic (*Aspergillus fumigatus*) and Ligninolytic (*Geotrichum* sp.) Fungi Inoculum Application on Vegetative Growth of Red Chili (*Capsicum annum* l.). *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 13(2), 815–821.

Jain, M. S., Daga, M., & Kalamdhad, A. S. (2018). Composting physics: A science behind bio-degradation of lignocellulose aquatic waste amended with inoculum and bulking agent. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 424–432.  
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.017>

- Jurado, M. M., Suárez-Estrella, F., Vargas-García, M. C., López, M. J., López-González, J. A., & Moreno, J. (2014). Increasing native microbiota in lignocellulosic waste composting: Effects on process efficiency and final product maturity. *Process Biochemistry*, *49*(11), 1958–1969.
- Liu, L., Wang, S., Guo, X., Zhao, T., & Zhang, B. (2018). Succession and diversity of microorganisms and their association with physicochemical properties during green waste thermophilic composting. *Waste Management*, *73*, 101–112.
- Nair, J., & Okamitsu, K. (2010). Microbial inoculants for small scale composting of putrescible kitchen wastes. *Waste Management*, *30*(6), 977–982.
- Negro, M., Villa, F., Aibar, J., Alarcón, R., Cristóbal, M., Benito, A. DE, García Martín, A., García Muriedas, G., Labrador, C., Lacasta, C., Lezaún, J., Meco, R., Pardo, G., Solano, M., Torner, C., Zaragoza, C., Zaragoza, D., Huesca, E., El Encín, I., ... Toledo, S. (2000). *Producción y gestión del compost*. 1–31.
- Oviedo-Ocaña, E. R., Marmolejo-Rebellon, L. F., & Torres-Lozada, P. (2017). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *18*(1), 31–42.
- Piaún Chavez, N. M. (2018). *Determinación de un proceso adecuado para disolver la base de celulosa de bambú para su posterior extrusión*. Universidad Técnica del Norte.

- 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.
- Roman, Pilar., Martínez, M. M., & Pantoja, Alberto. (2013). *Manual de compostaje del agricultor: experiencias en América Latina*. FAO.
- Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. In *Omnia Año* (Vol. 20, Issue 3).
- Saha, N., Mukherjee, D., Sen, S., Sarkar, A., Bhattacharaya, K. K., Mukhopadyay, N., & Patra, P. K. (2012). Application of highly efficient lignocellulolytic fungi in cocomposting of paddy straw amended poultry droppings for the production of humus rich compost. *Compost Science and Utilization*, *20*(4), 239–244.
- Sepúlveda, L. A., & Alvarado, J. A. (2013). *Manual de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos*.
- Setiawati, M. R., Suryatmana, P., Hindersah, R., Kamaluddin, N., & Efendi, S. (2019). The effectiveness of various compositions lignolytic and cellulolytic microbes in composting empty fruit bunch palm oil and sugar cane biomass. IOP Conference

Series: Earth and Environmental Science, 393(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/393/1/012032>

Song, C., Li, M., Wei, Z., Jia, X., Xi, B., Liu, D., Zhu, C., & Pan, H. (2016). Effect of inoculation with multiple composite microorganisms on characteristics of humic fractions and bacterial community structure during biogas residue and livestock manure co-composting. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91(1), 155–164.

Tai, H. S., & He, W. H. (2007). A novel composting process for plant wastes in Taiwan military barracks. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(2), 408–417. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.10.006>

Tortarolo, M. F., Pereda, M., Palma, M., & Arrigo, N. M. (2008). Influencia de la inoculación de microorganismos sobre la temperatura en el proceso de compostaje. In *SUELO (ARGENTINA)* (Vol. 26, Issue 1).

U. Zulia, G. Urdaneta, A. Joheni, y U. Zulia, “Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe”, *Omnia*, vol. 20, núm. 03, pp. 44, 2014,

V. Da Silva, “Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para la producción de biocombustibles y bioproductos,” *Univ. da Valladolid*, p. 219, 2015,

- Wang, H. Y., Fan, B. Q., Hu, Q. X., & Yin, Z. W. (2011). Effect of inoculation with *Penicillium expansum* on the microbial community and maturity of compost. *Bioresource Technology*, *102*(24), 11189–11193.
- Wang, S. L., Liu, Y., Liu, Y. Q., Gao, C. Da, & Liu, K. F. (2014). Effects of three different microbial agents on biodegradation of agriculture and forestry wastes. *Advanced Materials Research*, *955–959*, 2768–2773.
- 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*, 66–74.
- Wu, D., Wei, Z., Gao, X., Wu, J., Chen, X., Zhao, Y., Jia, L., & Wen, D. (2020). Reconstruction of core microbes based on producing lignocellulolytic enzymes causing by bacterial inoculation during rice straw composting. *Bioresource Technology*, *315*.
- Wu, Y., Chen, Y., Shaaban, M., Zhu, D., Hu, C., Chen, Z., & Wang, Y. (2019). Evaluation of microbial inoculants pretreatment in straw and manure co-composting process enhancement. *Journal of Cleaner Production*, *239*.

- Xu, J., Jiang, Z., Li, M., & Li, Q. (2019). A compost-derived thermophilic microbial consortium enhances the humification process and alters the microbial diversity during composting. *Journal of Environmental Management*, 243, 240–249.
- Xu, J., Xu, X., Liu, Y., Li, H., & Liu, H. (2016). Effect of microbiological inoculants DN-1 on lignocellulose degradation during co-composting of cattle manure with rice straw monitored by FTIR and SEM. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 35(2), 345–351.
- Yu, K., Li, S., Sun, X., Cai, L., Zhang, P., Kang, Y., Yu, Z., Tong, J., & Wang, L. (2019). Application of seasonal freeze-thaw to pretreat raw material for accelerating green waste composting. *Journal of Environmental Management*, 239, 96–102.
- 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.
- Zhang, J., Zeng, G., Chen, Y., Liang, J., Zhang, C., Huang, B., Sun, W., Chen, M., Yu, M., Huang, H., & Zhu, Y. (2014). *Phanerochaete chrysosporium* inoculation shapes the indigenous fungal communities during agricultural waste composting. *Biodegradation*, 25(5), 669–680.

Zhang, J., Zeng, G., Chen, Y., Yu, M., Huang, H., Fan, C., Zhu, Y., Li, H., Liu, Z., Chen, M., & Jiang, M. (2013). Impact of *Phanerochaete chrysosporium* inoculation on indigenous bacterial communities during agricultural waste composting. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(7), 3159–3169.

Zhou, C., Liu, Z., Huang, Z. L., Dong, M., Yu, X. L., & Ning, P. (2015). A new strategy for co-composting dairy manure with rice straw: Addition of different inocula at three stages of composting. *Waste Management*, 40, 38–43.

## Apéndices

### Apéndice A

*Ecuaciones y resultados de búsqueda en bases de datos.*

<b>Ecuación de búsqueda</b>	<b>Resultados Scopus</b>	<b>Resultados Web of Science</b>
Green waste <b>AND</b> composting <b>AND</b> inocu*	24	62
Lignocellulosic waste <b>AND</b> composting <b>AND</b> inoculum	8	15
Ligno* <b>AND</b> waste <b>AND</b> composting <b>AND</b> inocu*	48	63
Green waste <b>AND</b> composting <b>AND</b> inoculum	16	21
Lignocellulosic waste <b>AND</b> composting <b>AND</b> inocu*	20	30
Lignocellulosic <b>AND</b> waste <b>AND</b> composting <b>AND</b> inoculum	11	11
<b>Total</b>	<b>127</b>	<b>202</b>