

Los beneficios de los microorganismos en las diferentes etapas de compostaje

Bruce Manuel Morales-Barron^{1,2*} **iD**, Dulce Olivia Flores-Martínez¹ **iD**, Samantha Jiménez-Vargas³ **iD**, Lester Emmanuel López-Cruz^{2,3} **iD**, Jesús Muñoz-Rojas² **iD**

¹Laboratorio de Parasitología y Microbiología Veterinaria, Medicina Veterinaria Zootecnista, Universidad Realística de México, Puebla, México. ²Grupo “Ecology and Survival of Microorganisms”, Laboratorio de Ecología Molecular Microbiana, Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Puebla, México. ³Laboratorio de Ecología y Biotecnología Aplicada, Departamento de Ciencias e Ingenierías, Universidad Iberoamericana Puebla, Puebla, México.

Email de autor para correspondencia: *bio.brucemorales@outlook.com

Recibido: 26 agosto 2024. **Aceptado:** 28 noviembre 2024

RESUMEN

El proceso de compostaje aprovecha de manera eficiente los residuos generados en la ganadería, la agricultura y las zonas urbanas, además es una excelente alternativa para la nutrición de las plantas. Se han descrito diferentes sustratos, entre los más comunes se encuentran los desechos de animales de zootecnia, residuos sólidos urbanos y heces caninas, para lo cual se buscan estrategias que aceleren el proceso sin que se pierda la calidad del compostaje. El estudio de los microbiomas que existen en el compostaje y lombricompostaje nos llevan a describir los hongos y bacterias involucrados en cada una de sus fases para poder determinar su aplicación, dependiendo del tipo de sustrato que se utilizará, con la finalidad de estabilizar y acelerar el proceso aumentando la calidad del mismo.

Palabras clave: Compostaje; inoculantes; microorganismos.

ABSTRACT

The composting process benefits in the utilization of livestock, agricultural, and urban waste. Additionally, it is an excellent alternative for plant nutrition. Various substrates have been described, ranging from the most common such as animal husbandry waste, urban solid waste, to dog feces. Therefore, strategies are being sought to accelerate the process without compromising quality. The study of microbiomes present in composting and vermicomposting leads us to describe the fungi and bacteria involved in each of their phases, aiming to determine their application depending on the type

of substrate used. This is done with the purpose of stabilizing and accelerating the process, thereby increasing its quality.

Keywords: Composting; inoculants; microorganisms.

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos orgánicos en la actualidad es alta debido al mal manejo que se tiene, usualmente las causas están relacionadas con el desperdicio de alimentos, crecimiento poblacional, producción agrícola, migración del área rural a la urbana, desarrollo poco planificado y cambios del estilo de vida en las sociedades [1, 2]. Este fenómeno afecta al medio ambiente, la economía y también compromete la seguridad alimentaria de los países. Sin embargo, los residuos orgánicos pueden ser tratados mediante los procesos de compostaje. El compostaje es un método de descomposición aeróbico realizado por la biomasa microbiana habitante del suelo, mediante este proceso de sucesión microbiana la materia orgánica es transformada y mineralizada hasta la estabilización y obtención del producto llamado humus [3].

A través del proceso de compostaje se puede reducir la biomasa y el volumen de los sustratos utilizados, los residuos son revalorizados y pueden posteriormente ser utilizados en la agricultura para el mejoramiento de los suelos [4, 5]. Además, el bajo costo de operación representa, sin duda, la mayor ventaja [6].

Los microorganismos realizan un papel importante en nuestro planeta, son los

principales descomponedores de la materia orgánica, su metabolismo versátil les permite degradar diferentes compuestos de manera gradual y natural [7]. Los microorganismos presentes en el proceso de compostaje se encuentran expuestos a diferentes condiciones del medio ambiente, tanto físicas como químicas, entre las que destaca la temperatura, el oxígeno, la humedad, el pH, el tamaño de la partícula y la relación de carbono y nitrógeno. Factores que están directamente relacionados con la velocidad del proceso de compostaje [8].

Los cambios de temperatura permiten que diferentes comunidades microbianas actúen y se reproduzcan. Dos fases se distinguen durante el proceso de compostaje, la primera en la que se lleva a cabo la mayor tasa de degradación de los compuestos y una segunda fase donde ocurre la humificación de la materia orgánica [5]. Un factor determinante en la degradación de los residuos orgánicos por los microorganismos es la actividad enzimática, el metabolismo microbiano es crucial para que los residuos sean transformados y aprovechados como fuente de energía, mediante la expresión de proteínas intracelulares y extracelulares [8]. Dentro de este proceso se destacan enzimas como amilasas [9], celulasas, liasas, pectinasas, hemicelulasas [10], las principales bacterias que las producen son las del género *Bacillus*



[11-13] y *Pseudomonas* [14, 15], del mismo modo se han descrito hongos que se conocen como degradadores de lignina en donde destacan los generos de *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Penicillium* [16].

En los años recientes se ha enfocado el estudio de los microorganismos del suelo de composta, mediante métodos moleculares para explorar la estructura de las comunidades microbianas involucradas en los procesos de transformación. Estos estudios han permitido la identificación de los filos bacterianos predominantes, siendo los más importantes Firmicutes, Bacteroidetes, Actinobacterias y Proteobacterias, que se encuentran presentes en las diferentes fases del compostaje [17-19]. Diferentes hongos filamentosos participan también durante el proceso de degradación de los residuos orgánicos [18]. El desarrollo de los métodos moleculares ha sido aplicado debido a la limitación con los microorganismos no cultivables y ha generado una idea de la complejidad que conlleva el proceso, por lo que en la presente revisión se hace una descripción del proceso de compostaje y los microorganismos que se ven involucrados en cada una de sus fases.

La mezcla de desechos es importante para el inicio de la composta

La elaboración de compostaje es una técnica que se ha realizado desde los inicios de la agricultura, debido a que se busca beneficiar los suelos de forma natural y ahorrar costos de producción, por lo que se utilizan materiales

con los que se pueda obtener un producto de calidad [3]. Aunque el principal sustrato para las compostas es el material vegetal se debe considerar la relación carbono/nitrógeno (C/N) que debe de ir entre 30% a 25% partes de carbono y 1%-5% de nitrógeno, de igual manera es importante considerar la relación de carbono-fósforo, el tamaño de partícula y nutrientes de los materiales a compostar [20]. El correcto equilibrio beneficiará a los microorganismos involucrados en el proceso [17], principalmente a los microorganismos con la capacidad de degradar la pared celular de los compuestos vegetales, la cual se constituye por una fase fibrilar o esqueleto compuesta principalmente por celulosa y una fase amorfa que se compone por hemicelulosa, lignina, compuestos pépticos y glucoproteínas [21], siendo la lignina uno de los compuestos con mayor importancia por presentar una estructura de difícil degradación [16].

El estiércol de animales de zootecnia como sustrato

Uno de los sustratos más usados son los estiércoles de animales de zootecnia debido al fácil acceso que tiene el agricultor y que es una buena alternativa para aprovechar los residuos de la industria ganadera. Principalmente los animales rumiantes presentan un beneficio en su sistema digestivo, es importante mencionar que un buen sistema digestivo les beneficia en la fijación de carbono y en su biomasa microbiana lo que reduce pérdidas de carbono y metano [22], además que su capacidad de

consumir material vegetal se debe a la asociación que tienen con bacterias, hongos y protozoos con alta capacidad proteica en donde destaca la proteólisis, la peptidolisis y a la desaminación [21]. Uno de los principales estiércoles utilizados son los provenientes de los bovinos, ya que presentan un rumen, el cual no produce enzimas capaces de degradar las uniones β 1,4 y β 1,6 glucosídicas que constituyen las paredes celulares, pero presenta un microbioma que tiene un complejo enzimático capaz de degradar la celulosa, hemicelulosa y lignina de los componentes vegetales [23]. Dentro de los principales hongos se encuentran los del orden Neocallismatigales.

La capacidad de consumir carbohidratos provenientes del material vegetal depende de la capacidad de la adaptación de los microorganismos sobre las estructuras vegetales y a la acción enzimática sobre el material vegetal. El usar este tipo sustratos ayuda al proceso de compostaje debido a que la primera fase del proceso de compostaje se ha iniciado y solo se requiere de una estabilización del proceso [24], sin embargo, los estiércoles de animales de zootecnia presentan parásitos zoonóticos en los que se destacan nematodos, cestodos y protozoarios, por lo que se debe de tener un cuidado en el manejo del animal, respetando siempre los protocolos de desparasitación y el equipo de bioseguridad al manejar los estiércoles [25].

Las heces de animales domésticos como sustrato para la composta

En la actualidad se ha buscado generar compostas a partir de heces de animales domésticos principalmente de gatos y perros debido a que son usados como animales de compañía, sin embargo, una problemática que se presenta son los parásitos zoonóticos que pueden albergar en sus intestinos [26]. Se ha descrito que las especies que comúnmente se presentan en las heces son *Ancylostoma caninum*, *Toxocara canis* y *Trichuris vulpis* [27], sin embargo, depende del cuidado que se tenga a las mascotas. En un estudio realizado a caninos domiciliarios y callejeros se ha demostrado que caninos domiciliarios presentan menor prevalencia de parásitos intestinales en comparación a los callejeros [28], por lo que la desparasitación constante y la asistencia al veterinario evitaría una posible zoonosis al manejar las heces [29]. Además, en la segunda fase la elevación de temperatura eliminaría los huevos de los parásitos, por lo que un buen cuidado de las mascotas sería la clave para el uso de las heces de animales domésticos como un sustrato para la composta. En la ciudad de Potosí Bolivia se ha descrito la presencia de caninos callejeros que defecan constantemente proponiendo como alternativa un uso de un biodigestor para heces caninas para la reducción de heces en la calle [30]. Asimismo, se ha investigado la producción de composta a partir de heces caninas, demostrando que la combinación con residuos orgánicos puede mejorar su valor nutricional y facilitar el alcance de las temperaturas óptimas

necesarias para un compostaje eficiente [31].

Los residuos sólidos urbanos como sustrato

Actualmente se ha dado la tendencia de realizar compostaje a partir de residuos sólidos urbanos (RSU), los cuales incluyen todo el material vegetal proveniente de las zonas residenciales, se calcula que en promedio un mexicano produce 0.944 kilogramos de RSU al día, lo que representa de 120 a 128 mil toneladas diariamente en el país [32]. Por lo que se buscan alternativas para aprovechar estos desechos y no terminen en los rellenos sanitarios donde pueden generar enfermedades o problemas ambientales, sin embargo, el proceso de compostaje de estos desechos depende del tratamiento que se realice, debido a que al inicio se debe de agregar materiales extras para mantener el equilibrio de C/N, al igual que se les debe de dar una buena oxigenación para que se pueda dar una adaptación de las bacterias u hongos que se encarguen de realizar el proceso de compostaje [33].

Fuentes de microorganismos para el inicio de la composta

Una situación para considerar es el inicio de la mezcla de compostaje, ya que es necesario agregar una fuente de microorganismos para que el proceso se lleve a cabo. De manera natural, se pueden incorporar suelos, estiércoles o compostas previas, además del uso la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*), la cual es la lombriz más usada debido a que en su intestino presenta una simbiosis con bacterias que

aceleran y benefician la degradación de la materia orgánica [34]. Sin embargo, la tendencia va hacia el uso de microorganismos de forma dirigida, ya sea a partir de un cultivo rudimentario con los microorganismos de montaña, esta práctica se lleva a cabo utilizando una trampa casera en suelos de bosque con la que se busca obtener microorganismos benéficos [35], para esta práctica hay que considerar que en los suelos se pueden encontrar patógenos para nuestras plantas y en lugar de obtener un beneficio, se puede terminar contaminando el producto final con patógenos, por lo que la alternativa más eficaz es el uso de inoculantes bacterianos o fúngicos, que se caracterizan por ser microorganismos a los que se les han probado sus capacidades en laboratorios sobre diferentes sustratos y con ellos se realice una aplicación dirigida para el tipo de sustrato que usaremos en el proceso de compostaje [36, 37].

La importancia de las fases de la composta

El compostaje se debe de producir desde una vista microbiológica, ya que las características de cada fase son determinadas por la adaptación y el crecimiento de los microorganismos que inicien la degradación de la materia. El proceso es determinado por 4 fases (Mesofílica I, termófila, enfriamiento o mesofílica II y maduración) (Figura 1), las primeras dos fases se caracterizan por la adaptación y proliferación de bacterias y hongos específicos que dependen del tipo de sustrato que se colocará para la degradación [38], Una variable clave a

controlar es la relación carbono/nitrógeno (C/N), ya que esta determina la adecuada proliferación de bacterias y hongos durante el proceso.

Los microorganismos involucrados en la primera fase del compostaje

La fase mesofílica I se caracteriza por la adaptación de bacterias y dependiendo del sustrato se realizará una estabilización, por ejemplo, en sustratos de desechos orgánicos residenciales se presenta el inconveniente de que el exceso de azúcares combinado con una falta de oxigenación produzca procesos fermentativos que desestabilicen el proceso, o en excretas de caninos y animales de zootecnia

en donde se presenta la problemática del mal manejo de los parásitos zoonóticos, los cuales podrían terminar por proliferar e infectar al personal que manipule las compostas, por lo que el manejo en esta fase es crucial para un excelente proceso [39].

En la primera fase, la alimentación de bacterias empezará a producir ácidos orgánicos debido a la descomposición de los azúcares, en donde destacan compuestos como ácido cítrico, succínico, oxálico, láctico, acético y fórmico, presentándose en rangos totales de 45.7 mg/g a 82.7 mg/g [40]. La mayor formación de estos compuestos se ha medido desde el día 3 hasta el día 12 del proceso.

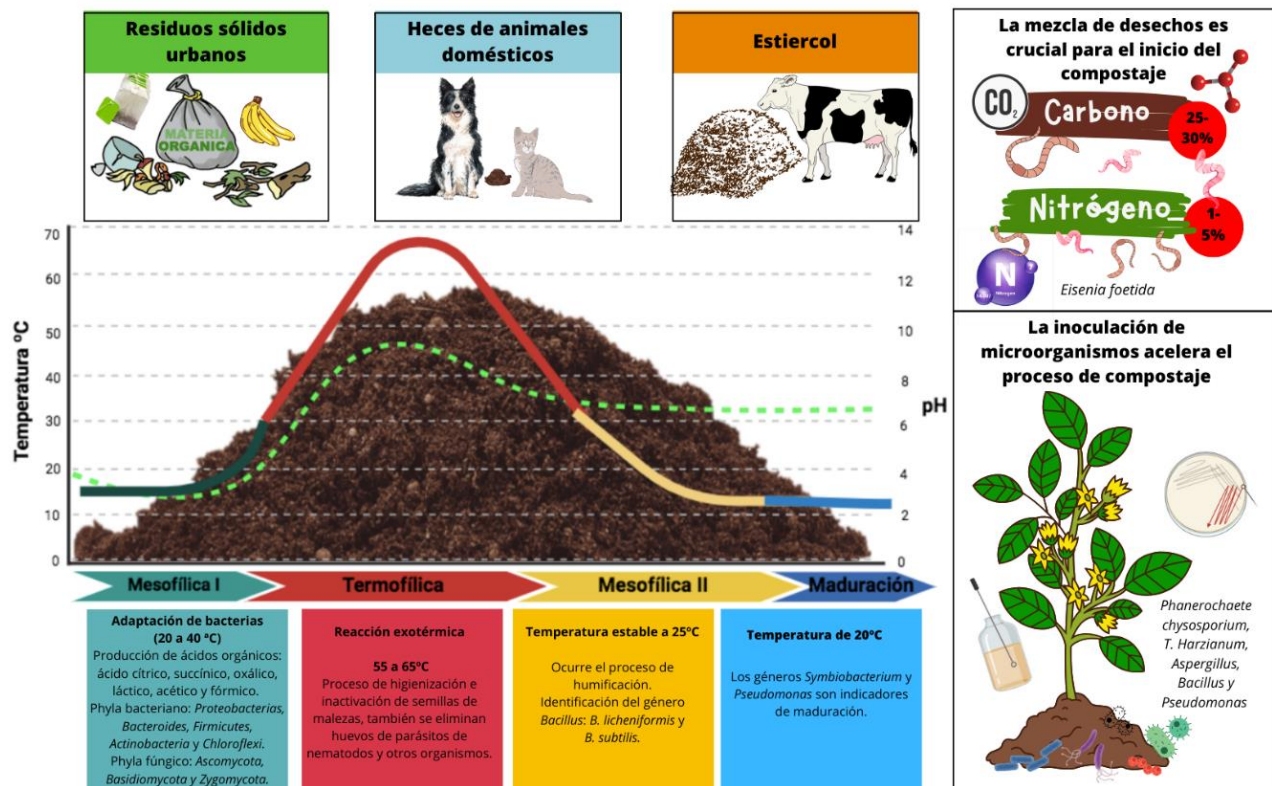


Figura 1. Fases del compostaje y los microorganismos que intervienen.

La identificación de microorganismos específicos que sean responsables del proceso no se ha logrado, debido a que se considera la asociación que realizan diversos grupos durante el proceso, sin embargo, algunos *phyla* bacteriano que se han identificado en mayor abundancia son las *Proteobacterias*, *Bacteroides*, *Firmicutes*, *Actinobacteria* y *Chloroflexi* y respecto a las comunidades fúngicas se han identificado los *phyla* *Ascomycota*, *Basidiomycota* y *Zygomycota* [41].

Los microorganismos involucrados en la fase termófila del compostaje

La creación de ácidos orgánicos es considerada como una reacción exotérmica que se caracteriza por liberar calor. Este proceso origina lo que se conoce como la segunda fase del proceso de compostaje que tiene como característica una elevación de la temperatura que varía entre 55 a 65 grados centígrados [42], esta fase es conocida como termófila y es de gran importancia porque se realiza un proceso de eliminación de patógenos al igual que la inactivación de semillas de malezas que puedan estar en el sustrato inicial. Además, en esta fase se realiza la eliminación de huevos de parásitos de nematodos y otros organismos patógenos para el humano y las plantas [43]. En esta fase la proliferación de hongos y bacterias actinomicetos del género *Streptomyces* es abundante, destacándose por sus capacidades de degradar la celulosa, hemicelulosa y la lignina de las células vegetales [44], al igual a

capacidad de desarrollarse a esas temperaturas.

Microorganismos degradadores de lignina, celulosa y hemicelulosa

Para la fase termófila los hongos filamentosos desempeñan una función muy importante debido a la producción de enzimas lignocelulolíticas en donde destacan especies como *Trichoderma reeser*, *Aspergillus niger*, *Penicillium* sp. y *Phanerochaete chrysosporium* [16]. El degradar a la lignina es primordial para la hidrólisis de celulosa y hemicelulosa, ya que esta funciona como una estructura de soporte para estos compuestos [45]. Sin embargo, se ha estudiado que la expresión de los genes lignolíticos es dada por una respuesta al estrés causado por la ausencia de nutrientes como el nitrógeno, carbono o azufre [16]; lo cual tiene una relevancia al hecho de que en la primera fase las principales fuentes de carbono se hayan consumido y den inicio a la proliferación de microorganismos capaces de degradar compuestos vegetales más complejos. Además de los hongos se han aislado diversas bacterias del género *Streptomyces*, este género es uno de los que se han descrito con mayor eficacia en este proceso. En esta etapa abundan los microorganismos termófilos debido a que a los 55 grados realizan sus actividades metabólicas sin problema [17]. El género *Streptomyces* es importante por la capacidad de degradar materia, producir metabolitos secundarios, solubilizar fosfatos, producir ácidos orgánicos, sideróforos y fitohormonas [44].

Se han aislado diversas especies de

Streptomyces que desempeñan un papel crucial en la aceleración del proceso de degradación. Un ejemplo destacado es *Streptomyces* sp. 7CMC10 [46] aislada en procesos de compostaje, que ha demostrado ser capaz de incrementar la temperatura durante el proceso, favoreciendo así una degradación más eficiente.

Aunado al género *Streptomyces* el género *Bacillus* también realiza un papel importante, por su capacidad de degradar celulosa y la secreción de compuestos antagonicos con los que inhiben bacterias, hongos y posibles patógenos [47]. Es crucial el mantener una aireación en esta parte del proceso, ya que la degradación de lignina solo ocurre bajo condiciones aerobias [16], para estos procesos se destacan especies como *B. licheniformis* [12, 13] y *B. subtilis* [48].

La estabilización en la fase mesofílica II y la maduración

Al finalizar la fase termófila la temperatura empieza a estabilizarse en aproximadamente 25 centígrados, lo que lleva a la proliferación de los bacterias y hongos que sobrevivieron a la fase termófila y los que secreten compuestos antagonicos, ya que en esta fase los nutrientes empiezan a estabilizarse y se da el proceso de humificación.

El género *Bacillus* es uno de los que más se han aislado en esta etapa de compostas por su capacidad de sobrevivir a las elevadas temperaturas [49]. Esta actividad está estrechamente relacionada con las capacidades

de ciertas especies, como *Bacillus licheniformis*, que tiene la habilidad de proliferar en suelos y se utiliza en procesos de biorremediación. Además de tener diversas aplicaciones biotecnológicas [12] que pueden beneficiar a la producción agrícola, se ha visto que cepas de *Bacillus* que provienen de un proceso final de lombricompostaje tiene una excelente capacidad antagonica en contra de hongos fitopatógenos [50], esto se ha reportado en otras cepas de *Bacillus* [51]. La estabilización de este género también contribuye a la nutrición de las plantas mediante la producción de fitohormonas, que favorecen su crecimiento [52], este tipo de actividades se han descrito en especies como *B. subtilis* [53, 54].

Un género que sirve como indicador de una maduración de compostaje es *Symbiobacterium* el cual se caracteriza por ser comensal de cepas del género *Bacillus* y presentarse en grandes cantidades en la etapa de maduración de las compostas [55].

El género *Pseudomonas* es también de los que se han aislado en esta etapa de compostaje [15, 56], se conoce que las especies del género *Pseudomonas* presentan capacidades antagonicas [57, 58], lo cual es importante para la estabilización nutricional de esta etapa. Una especie que se ha visto involucrada en la fijación de nitrógeno es *Pseudomonas azotifigens* la cual ha sido aislada de una pila de compostaje de estiércol de vaca [59].

La importancia del uso de inoculantes para el proceso de compostaje

El uso de inoculantes microbianos se ha estudiado en los últimos años en beneficio de la agricultura [60], por lo que conocer cuáles son los microorganismos que participan en el proceso de compostaje nos ayuda a determinar cuáles podemos aplicar para que el proceso de degradación se acelere o se establezca. Se han aislado bacterias de etapas de compostaje o lombricompostaje [49], que sirven para demostrar que al aplicarlos se puede acelerar la dinámica de microorganismos y la degradación [37]. Al inocular *Phanerochaete chrysosporium* en la segunda fase de fermentación, se ha descrito que promueve el decremento de la relación de C/N en compostas con desechos orgánicos de cocina [61], al igual que el uso de hongos lignocelulosos como *T. harzianum* y *Aspergillus* sp. en donde se han inoculado en la primera etapa y rápidamente alcanza la fase termófila en sustratos como bagazo de maguey con estiércoles de bovino [62]. Para aplicar un inoculante, un factor a considerar es el sustrato inicial que se utilizará, en algunos casos el uso de residuos sólidos urbanos es inoculado con bacterias del género *Bacillus* y *Pseudomonas* debido a que tienen una excelente capacidad de degradación enzimática. Se determinó que al aplicarse en una concentración 1×10^7 UFC/mL la composta estuvo lista 4 semanas antes y se obtuvo una mejor estabilización de pH y temperatura que el control [63], del mismo modo su capacidad antagónica elimina fitopatógenos que puedan presentarse en los sustratos de compostaje [64].

Además, Se ha descrito que la inoculación de bacterias del género *Streptomyces* beneficia los procesos de biorremediación y degradación, debido a su capacidad para producir enzimas. Estas bacterias son también abundantes en los procesos de compostaje [44]. El aplicar hongos y bacterias en la primera o segunda fase de compostaje es clave para realizar un buen proceso, por lo que las nuevas tendencias van encaminadas a aplicar microorganismos de manera dirigida que incrementen los nutrientes y beneficien el proceso de degradación.

CONCLUSIÓN

El proceso de compostaje es complejo debido a que depende de factores ambientales y a la adaptación de microorganismos, sin embargo, se puede realizar con diferentes sustratos lo que lo hace accesible y rentable. Conocer las fases de compostaje junto a sus microorganismos beneficia la producción de un abono de calidad, por lo que el género de bacterias como *Bacillus*, *Streptomyces* y *Pseudomonas*, al igual que hongos lignolíticos se consideran clave para inocularlos en las fases en donde puedan proliferar. Esto permitirá acelerar los procesos y obtener un abono de alta calidad, ideal para las producciones agrícolas.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no tienen ningún conflicto de interés con el contenido de este manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

A la VIEP-BUAP por el apoyo para llevar a cabo nuestras investigaciones. El Dr. Jesús Muñoz-Rojas es miembro del S.N.I.I.; por lo que agradece a esta institución por su apoyo. También agradecemos a la Dirección Internacionalización de la Investigación de la BUAP, quienes amablemente nos apoyan para que el conocimiento rebase las fronteras nacionales.

REFERENCIAS

- [1]. Ramírez N. VM, Peñuela S. LM, Pérez R. MDR. Los residuos orgánicos como alternativa para la alimentación en porcinos. Revista de Ciencias Agrícolas. 2017 Dec 20;34(2). Disponible en: <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rfacia/article/view/3695>
- [2]. Wang S, Zeng Y. Ammonia emission mitigation in food waste composting: A review. Vol. 248, Bioresource Technology. Elsevier Ltd; 2018. p. 13–9. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241731146X>
- [3]. Sánchez ÓJ, Ospina DA, Montoya S. Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. Vol. 69, Waste Management. Elsevier Ltd; 2017. p. 136–53. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17305846>
- [4]. Gea T, Artola A, Sánchez A. Composting of de-inking sludge from the recycled paper

manufacturing industry. Bioresour Technol. 2005 Jul;96(10):1161–7. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852404003566>

[5]. Ribeiro N de Q, Souza TP, Costa LMAS, de Castro CP, Dias ES. Aditivos microbianos no processo de compostagem. Ciencia e Agrotecnología. 2017;41(2):159–68. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/1413-70542017412038216>

[6]. Kamyab H, Goh RKY, Wong JH, Lim JS, Khademi T, Ho WS, *et al.* Cost-benefit and greenhouse-gases mitigation of food waste composting: A case study in Malaysia. Chem Eng Trans. 2015 Oct 1;45:577–82. Disponible en: <https://www.cetjournal.it/index.php/cet/article/view/CET1545097>

[7]. Bohórquez Santana W. El proceso de compostaje. Vol. 1. 2019. 20–25 p. Disponible en: <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/5c6d8ea8-fbb0-4999-8883-a089fa4d518b/content>

[8]. Robledo-Mahón T, Calvo C, Aranda E. Enzymatic potential of bacteria and fungi isolates from the sewage sludge composting process. Applied Sciences (Switzerland). 2020 Nov 1;10(21):1–13. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/21/7763>

[9]. Moreno MQ, Campuzano OIM, Sánchez PAG. Purificación, caracterización de una α -amilasa producida por la cepa nativa *Bacillus* sp. BBM1. DYNA (Colombia). 2010;77(162):31–8. Disponible en:

http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532010000200004

[10]. Mena-Espino X, Mena-Espino E, Tavera-Cortés E. Enzimas y organismos importantes dentro del proceso de compostaje. *TECNOCENCIA* Chihuahua. 2017;11(3):147-154. Disponible en: <https://revistascientificas.uach.mx/index.php/tecnocencia/article/view/94>

[11]. Harwood CR, Cranenburgh R. *Bacillus* protein secretion: an unfolding story. *Trends Microbiol.* 2008;16(2):73–9. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0966842X0700248X>

[12]. Muras A, Romero M, Mayer C, Otero A. Biotechnological applications of *Bacillus licheniformis*. *Crit Rev Biotechnol* [Internet]. 2021;41(4):609–27. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1873239>

[13]. Nallusamy S, Amira AZ, Saif AB, Abdulkhadir E, Elsadig AE. Isolation and characterization of cellulolytic *Bacillus licheniformis* from compost. *Afr J Biotechnol.* 2016;15(43):2434–46. Disponible en: <https://academicjournals.org/journal/AJB/article-full-text/1C01A9A61316>

[14]. Sanchez-Carrillo R, Guerra-Ramírez Priscila. *Pseudomonas* spp. benéficas en la agricultura. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2022;13(4):715-725. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342022000400715

[15]. Gibello A, Vela AI, Martin M, Mengs G, Alonso PZ, Garbi C, *et al.* *Pseudomonas*

composti sp. nov., isolated from compost samples. *Int J Syst Evol Microbiol.* 2011 Dec;61(12):2962–6. Disponible en: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/ijsem/10.1099/ijms.0.027086-0>

[16]. Ortiz ML. Aproximaciones a la comprensión de la degradación de la lignina. *Orinoquia.* 2009;13(2):137–44. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/896/89613728007.pdf>

[17]. Camacho AD, Martínez L, Saad HR. Potencial de algunos microorganismos en el compostaje de residuos sólidos. *Terra Latinoamericana.* 2014;32(4):291–300. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792014000400291

[18]. Antunes LP, Martins LF, Pereira RV, Thomas AM, Barbosa D, Lemos LN, *et al.* Microbial community structure and dynamics in thermophilic composting viewed through metagenomics and metatranscriptomics. *Sci Rep.* 2016 Dec 12;6. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/srep38915>

[19]. Silva MEF, Lopes AR, Cunha-Queda AC, Nunes OC. Comparison of the bacterial composition of two commercial composts with different physicochemical, stability and maturity properties. *Waste Management.* 2016 Apr 1;50:20–30. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16300708>

[20]. Álvarez JM. Manual compostaje para Agricultura Ecológica. *Compostaje para Agricultura Ecológica.* 2010. 49 p. Disponible

en:

https://www.researchgate.net/publication/311789650_Manual_de_compostaje_para_Agricultura_Ecologica

[21]. Valenciaga D, Chongo B. La pared celular. Influencia de su naturaleza en la degradación microbiana ruminal de los forrajes. Vol. 38, Revista Cubana de Ciencia Agrícola. 2004. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193017793001.pdf>

[22]. Rodríguez R, Sosa A, Rodríguez Y. La síntesis de proteína microbiana en el rumen y su importancia para los rumiantes. Vol. 41, Revista Cubana de Ciencia Agrícola. 2007. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193017712001>

[23]. Galindo J, Elías A, Muñoz E, Marrero Y, González N, Sosa A. Activadores ruminales, aspectos generales y sus ventajas en la alimentación de animales rumiantes. Cuban Journal of Agricultural Science. 2017;51(1). Disponible en: http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2079-34802017000100002

[24]. Harmon DL, Swanson KC. Review: Nutritional regulation of intestinal starch and protein assimilation in ruminants. In: Animal. Cambridge University Press; 2020. p. S17–28. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731119003136?via%3Dihub>

[25]. Robin C, Bettridge J, McMaster F. Zoonotic disease risk perceptions in the British

veterinary profession. Prev Vet Med. 2017 Jan 1;136:39–48. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167587716306109?via%3Dihub>

[26]. Ghasemzadeh I, Namazi SH. Review of bacterial and viral zoonotic infections transmitted by dogs. J Med Life. 2015;8:1–5. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28316698/>

[27]. Gates MC, Nolan TJ. Endoparasite prevalence and recurrence across different age groups of dogs and cats. Vet Parasitol. 2009 Dec 3;166(1–2):153–8. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304401709004634?via%3Dihub>

[28]. Aguillón-Gitierrez D, Meraz-Rodríguez Y, García de la Peña C, Ávila-Rodríguez V, Rodríguez-Vivas R, Moreno-Chávez M. Prevalencia de parásitos en heces fecales de perros de Gómez Palacio, Durango, México. Abanico Veterinario. 2021;11:1-16. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-61322021000100127

[29]. Encalada-Mena LA, Vargas-Magaña JJ, Duarte-Ubaldo IE, García-Ramírez MJ. Control parasitario en perros y gatos: conocimiento sobre las principales enfermedades parasitarias en el sureste mexicano. Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú. 2019 Dec 1;30(4):1678–90. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1609-91172019000400030

[30]. Vera RC, Delgado Janko I, Villalpando

Villavicencio SC, Salamanca Filipps FA, Subieta Cortez VG. Un problema de salud pública: las heces fecales caninas y su peligro para los habitantes de la ciudad de Potosí. *Emergentes - Revista Científica*. 2024 Jun 6;4(2):145–61. Disponible en:

<https://revistaemergentes.org/index.php/cts/article/view/137>

[31]. Martínez-Sabater E, García-Muñoz M, Bonete P, Rodriguez M, Sánchez-García FB, Pérez-Murcia MD, *et al.* Comprehensive management of dog faeces: Composting versus anaerobic digestion. *J Environ Manage*. 2019 Nov 15;250. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479719311557>

[32]. Gobierno de México. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. 2020. Disponible en:

<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/diagnostico-basico-para-la-gestion-integral-de-los-residuos-2020>

[33]. Kadir AA, Azhari W, Jamaludin SN. An Overview of Organic Waste in Composting. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 47:05025. Disponible en:

https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2016/10/mateconf_iconees2016_05025/mateconf_iconees2016_05025.html

[34]. Kim H jung, Shin K hee, Cha C jun, Hur H gil. Analysis of aerobic and culturable bacterial community structures in earthworm (*Eisenia fetida*) intestine. *Journal of Applied Biological Chemistry*. 2004;47(3):137–42.

Disponible en:
<https://koreascience.kr/article/JAKO200410103436472.page>

[35]. Torres Pérez JC, Aguilar Jiménez CE, Vázquez Solís H, Solís López M, Gómez Padilla E, Aguilar Jiménez JR. Evaluación del uso de microorganismos de montaña activados en el cultivo de rosas, Zinacantán, Chiapas, México. *Siembra*. 2022 Feb 16;9(1):e3500. Disponible en:

<https://www.redalyc.org/journal/6538/653869372005/html/>

[36]. Rodríguez D, Ruiz A, Martínez-Salgado M, Matiz A. Uso de un inoculante termofílico en la transformación de residuos sólidos urbanos (RSU). *Universitas Scientarium*. 2007; 12(2):57-67. Disponible en:

<https://www.redalyc.org/pdf/499/49910969004.pdf>

[37]. Medina Lara MS, Quintero Lizaola R, Espinosa Victoria D, Alarcón A, Etchevers Barra JD, Trinidad Santos A, *et al.* Generación de un inoculante acelerador del compostaje. *Rev Argent Microbiol*. 2018 Apr 1;50(2):206–10. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0325754117301050>

[38]. Morales-Barrón BM. Etapas del composteo y sus beneficios microbiológicos. In: Conferencia de la Asociación Poblana de Ciencias Microbiológicas [Internet]. 2021. p. 1–2. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/349379086>

[39]. Awoke E, Bogale B, Chanie M. Intestinal

Nematode Parasites of Dogs: Prevalence and Associated Risk Factors. *Int J Anim Vet Adv.* 2011;3(5):374–8. Disponible en: <https://core.ac.uk/reader/199937310>

[40]. Wei Y, Zhao Y, Shi M, Cao Z, Lu Q, Yang T, *et al.* Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate-solubilizing bacteria inoculation. *Bioresour Technol.* 2018;247:190–9. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417316577>

[41]. Vásquez Castro ER, Millones Chanamé CE. Una revisión sobre la diversidad microbiana y su rol en el compostaje aerobio. *Aporte Santiaguino.* 2021; 14(2):253-275. Disponible en: https://revistas.unasam.edu.pe/index.php/Aporte_Santiaguino/article/view/822

[42]. Salazar TA. Actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de residuos sólidos orgánicos. *Revista de Investigación Universitaria.* 2014;3(2):74–84. Disponible en: <https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/riua/article/view/680>

[43]. Tortarolo MF, Pereda M, Palma M, Arrigo NM. Influencia de la inoculación de microorganismos sobre la temperatura en el proceso de compostaje. *Ciencia del Suelo.* 2008; 26(1):41-50. Disponible en: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1850-20672008000100005

[44]. Buzón-Durán L, Pérez-Lebeña E, Martín-Gil J, Sánchez-Báscones M, Martín-Ramos P.

Applications of *Streptomyces* spp. Enhanced Compost in Sustainable Agriculture. In 2020. p. 257–91. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-39173-7_13

[45]. Maceda A, Soto-Hernández M, Peña-Valdivia CB, Trejo C, Terrazas T. Lignin: composition, synthesis and evolution. *Madera y Bosques.* 2021; 27(2): e2722137. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712021000200300

[46]. Ramírez P, Cocha JM. Enzymatic degradation of cellulose for thermophilic actinomycete: isolation, characterization and cellulolytic activity determination. *Rev. Peru. Biol.* 2003; 10(1):67-77 Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332003000100008&lng=en

[47]. Villarreal-Delgado MF, Villa-Rodríguez ED, Cira-Chávez LA, Estrada-Alvarado MI, Parra-Cota FI, de los Santos-Villalobos S. El género *Bacillus* como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology.* 2018;36(1):95–130. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092018000100095

[48]. Duan M, Zhang Y, Zhou B, Qin Z, Wu J, Wang Q, *et al.* Effects of *Bacillus subtilis* on carbon components and microbial functional metabolism during cow manure–straw

composting. *Bioresour Technol.* 2020 May 1;303. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852420301371>

[49]. De La Mora A, Vazquez F, Galvan JV. Sucesión bacteriana del género *Bacillus* en el proceso de compostaje y lombricompostaje con diferentes fuentes de estiércol. *TECNOCENCIA Chihuahua.* 2016; 10(1):23–31. Disponible en: <https://revistascientificas.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/view/582>

[50]. Morales-Barrón BM, Vázquez-González FJ, González-Fernández R, Mora-Covarrubias AD La, Quiñonez-Martínez M, Díaz-Sánchez ÁG, *et al.* Evaluación de la capacidad antagonista de cepas del orden bacillales aisladas de lixiviados de lombricomposta sobre hongos fitopatógenos. *Acta Univ [Internet].* 2017;27(5):44–54. Available from: <http://www.actauniversitaria.ugto.mx/index.php/acta/article/view/1313>

[51]. Morales-Barrón B, González-Fernández R, Vázquez-González F, De La Mora-Covarrubias A, Quiñonez-Martínez M, Muñoz-Rojas J, *et al.* Importancia del Secretoma de *Bacillus* spp. en el control biológico de hongos fitopatógenos. *Alianzas y Tendencias BUAP.* 2019;4(15):36–48. Disponible en: <https://www.aytbuap.mx/aytbuap-415/importancia-del-secretoma-de-bacillus-spp-en-el-control-biol%C3%B3gico-de-hongo>

[52]. Tejera-Hernández B, Rojas-Badia M, Heydrich-Pérez M. Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento

vegetal y el control biológico de hongos fitopatógenos. 2011;42(3):131–8. Disponible en:

<https://www.redalyc.org/pdf/1812/181222321004.pdf>

[53]. Tjalsma H, Antelmann H, Jongbloed J, Braun P, Darmon E, Dorenbos R, *et al.* Proteomics of Protein Secretion by *Bacillus subtilis*: Separating the “Secrets” of the Secretome. *Microbiol Mol Biol Rev.* 2004;68(2):207–33. Disponible en: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/membr.68.2.207-233.2004>

[54]. Voigt B, Antelmann H, Albrecht D, Ehrenreich A, Maurer KH, Evers S, *et al.* Cell physiology and protein secretion of *Bacillus licheniformis* compared to *Bacillus subtilis*. *J Mol Microbiol Biotechnol.* 2008;16(1–2):53–68. Disponible en: <https://karger.com/mmb/article-abstract/16/1-2/53/197051/Cell-Physiology-and-Protein-Secretion-of-Bacillus?redirectedFrom=fulltext>

[55]. Nakasaki K, Hirai H, Mimoto H, Quyen TNM, Koyama M, Takeda K. Succession of microbial community during vigorous organic matter degradation in the primary fermentation stage of food waste composting. *Science of the Total Environment.* 2019 Jun 25;671:1237–44. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719313397>

[56]. Adegunloye D V., Adetuyi FC, Akinyosoye FA, Doyeni MO. Microbial analysis of compost using cowdung as booster. *Pakistan Journal of Nutrition.* 2007;6(5):506–

10. Disponible en: <https://scialert.net/abstract/?doi=pjn.2007.506.510>
- [57]. Al-Ghafri HM, Velazhahan R, Shahid MS, Al-Sadi AM. Antagonistic activity of *Pseudomonas aeruginosa* from compost against *Pythium aphanidermatum* and *Fusarium solani*. *Biocontrol Sci Technol*. 2020 Jul 2;30(7):642–58. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09583157.2020.1750562>
- [58]. Raaijmakers JM, de Bruijn I, Nybroe O, Ongena M. Natural functions of lipopeptides from *Bacillus* and *Pseudomonas*: More than surfactants and antibiotics. *FEMS Microbiol Rev*. 2010;34(6):1037–62. Disponible en: <https://academic.oup.com/femsre/article/34/6/1037/592387>
- [59]. Hatayama K, Kawai S, Shoun H, Ueda Y, Nakamura A. *Pseudomonas azotifigens* sp. nov., a novel nitrogen-fixing bacterium isolated from a compost pile. *Int J Syst Evol Microbiol*. 2005 Jul;55(4):1539–44. Disponible en: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/ijsem/10.1099/ijms.0.63586-0>
- [60]. Morales-García YE, Reyes-Rodríguez DP, Horacio O, Mares-Duran A, Mendoza-Rojas E, Muñoz-Rojas J. Microorganismos reportados en los microbiomas son claves para la salud de los hospederos. *Alianzas y Tendencias BUAP*. 2023;8(31). Disponible en: <https://www.aytbuap.mx/aytbuap-831>
- [61]. Zeng GM, Huang HL, Huang DL, Yuan XZ, Jiang RQ, Yu M, *et al*. Effect of inoculating white-rot fungus during different phases on the compost maturity of agricultural wastes. *Process Biochemistry*. 2009;44(4):396–400. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135951130800367X>
- [62]. Méndez-Matías A, Robles C, Ruiz-Vega J, Castañeda-Hidalgo E. Compostaje de residuos agroindustriales inoculados con hongos lignocelulósicos y modificación de la relación C/N. *Rev Mex De Cienc Agric*. 2018;9(2):271–80. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342018000200271
- [63]. Cariello M, Castañeda L, Riobo I, González J. Inoculante de microorganismos endógenos para acelerar el proceso compostaje de residuos sólidos urbanos. *RC Suelo Nutr Veg*. 2007;7(3):26–37. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ricsuelo/v7n3/art03.pdf>
- [64]. Dimkić I, Janakiev T, Petrović M, Degraasi G, Fira D. Plant-associated *Bacillus* and *Pseudomonas* antimicrobial activities in plant disease suppression via biological control mechanisms - A review. *Physiol Mol Plant Pathol*. 2022;117(March 2021). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0885576521001557>