



**Elaboración de abono orgánico a partir de desechos de cultivo de hongos ostra
(*Pleurotus ostreatus*) y estiércol porcino y bovino**

Poaquiza Yumbulema, Paul Alexander

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería en Biotecnología

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Biotecnología

Vargas Verdesoto, Rafael Eduardo Mgs.

19 de agosto de 2021

Hoja de resultados de la herramienta Urkund



Document Information

Analyzed document	TrabajoDeTitulacion_PoaquiizaYumbutema_PaulAlexander corregido 18.08.2021 urkund final.docx (D111413228)
Submitted	8/18/2021 10:42:00 AM
Submitted by	
Submitter email	revargas@espe.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	revargas.espe@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Perfil_tesis1.docx Document Perfil_tesis1.docx (D78320316) Submitted by: lkponce@espe.edu.ec Receiver: lkponce.espe@analysis.arkund.com	 2
W	URL: https://www.slideshare.net/Reivaj_G/8manual-compostaje Fetched: 7/12/2021 8:52:47 PM	 6
W	URL: http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf Fetched: 11/27/2020 10:02:01 AM	 1
SA	PROY. INV. Duque Herrera Gilmar 17.10.19.docx Document PROY. INV. Duque Herrera Gilmar 17.10.19.docx (D57207883)	 2
SA	Tesis 18 02 2019.docx Document Tesis 18 02 2019.docx (D48070890)	 1



Vargas Verdesoto, Rafael Eduardo Mgs.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Elaboración de abono orgánico a partir de desechos de cultivo de hongos ostra (*Pleurotus ostreatus*) y estiércol porcino y bovino**” fue realizado por el señor **Poaquiza Yumbulema Paúl Alexander**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de agosto de 2021

Vargas Verdesoto, Rafael Eduardo Mgs.

C. C. 1708200538



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Poaquiza Yumbulema, Paúl Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 050286366-5, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Elaboración de abono orgánico a partir de desechos de cultivo de hongos ostra (*Pleurotus ostreatus*) y estiércol porcino y bovino”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 18 de agosto de 2021

Poaquiza Yumbulema, Paúl Alexander

C.C.: 050286366-5



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Poaquiza Yumbulema, Paúl Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 050286366-5, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**Elaboración de abono orgánico a partir de desechos de cultivo de hongos ostra (*Pleurotus ostreatus*) y estiércol porcino y bovino**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 18 de agosto de 2021

Poaquiza Yumbulema, Paúl Alexander

C.C.: 050286366-5

Dedicatoria

A mis padres Segundo y María,
por su guía, esfuerzo y apoyo incondicional.

A mis hermanos,
por ser mi motor y compañía a los largo de estos años.

A mis amigos más cercanos,
por los momentos amenos e inolvidables.

Todo lo hecho es por y para ustedes.

Paul Alexander Poaquiza

Agradecimientos

A mi familia, por ser el pilar fundamental en mi formación personal y enseñarme a afrontar las adversidades de la vida y ser mejor cada día, especialmente a mis padres Segundo y María, por su sacrificio constante e incondicional, por ser la guía en este largo camino. A mis hermanos, Rocío, Mayra, Verónica, Silvia, Kathy, Jonathan, Ana y Michael, cuya alegría y experiencia me han ayudado a hacer más llevaderos mis estudios superiores.

A mis profesores, quienes han aportado su granito de arena para mi formación académica desde la primaria a hasta la superior, todas sus enseñanzas me acompañarán en mi carrera profesional. A Rafael, por sus enseñanzas y apoyo constante en el último escalón de mis estudios.

A mis amigos Paúl, Nathaly F., Nathaly H., Pamela, Mauro, Daniel, Emilia, Cristina y César; quienes más que compañeros han sido hermanos, los momentos compartidos son y serán memorables.

A Karol B., quien ha sido un apoyo fundamental en los buenos y malos momentos durante mi período universitario.

Paul Alexander Poaquiza

Índice de contenido

Carátula.....	1
Hoja de resultados de la herramienta Urkund.....	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos.....	7
Índice de contenido	8
Listado de tablas	12
Listado de figuras	13
Resumen.....	15
Abstract	16
Capítulo I: Introducción.....	17
Formulación del problema	17
Justificación del problema	20
Objetivos de la investigación	23
Objetivo general.....	23
Objetivos específicos	23
Hipótesis	23
Capítulo II: Marco teórico.....	24
Suelo.....	24
Erosión del suelo.....	24

Materia Orgánica.....	25
Humus.....	25
Ácidos Húmicos	26
Ácidos Fúlvicos	26
Compostaje.....	27
Técnicas de compostaje	28
Condiciones para el diseño de un compostaje	28
Fases de compostaje.....	29
Variables de medición.....	31
Parámetros de seguimiento	32
Parámetros relativos	33
Hongos ostra (<i>Pleurotus ostreatus</i>).....	36
Podredumbre blanca	37
Estiércol	38
Capítulo III: Materiales y métodos	40
Localización Geográfica	40
Fase de campo.....	40
Fase Laboratorio.....	40
Ensayo preliminar del sistema de compostaje.....	40
Compostera tipo Balde	40
Material orgánico	41
Establecimiento del sistema de compostaje tipo pila	43
Compostera tipo pila	44
Residuos orgánicos	44

Control de Aireación.....	46
Control de Humedad	47
Control de pH.....	48
Análisis organoléptico	49
Olor (tipo e intensidad).....	49
Color.....	50
Análisis de Laboratorio.....	50
Muestreo.....	50
Cálculo de materia orgánica	51
Cálculo de Nitrógeno Total Kjeldahl	51
Análisis de fitotoxicidad	51
Análisis estadístico.....	52
Diseño experimental.....	52
Compostaje tipo balde	52
Compostaje tipo pila	53
Capítulo IV: Resultados.....	55
Diseño de sistema de compostaje tipo balde.....	55
Diseño de sistema de compostaje tipo pila.....	58
Temperatura.....	59
pH	60
Humedad	61
Olor	62
Color	64
Análisis de Fitotoxicidad.....	65

Análisis de elementos y Relación C/N	67
Capítulo V: Discusión	68
Capítulo VI: Conclusiones	74
Capítulo VII: Recomendaciones	76
Capítulo VIII: Bibliografía	77
Capítulo XIX: Anexos	88

Listado de tablas

Tabla 1. Composición de estiércol porcino y bovino.

Tabla 2. Material orgánico para la mezcla inicial del compostaje preliminar.

Tabla 3. Materiales utilizados para las mezclas de los tratamientos con estiércol bovino y porcino.

Tabla 4. Material orgánico a usar en las mezclas y su relación C/N.

Tabla 5. Material orgánico para los tratamientos suplementados con estiércol bovino y porcino.

Tabla 6. Valores referenciales para la aireación para sistemas de compostaje.

Tabla 7. Parámetros de humedad óptimos.

Tabla 8. Fases del proceso de compostaje en función de su temperatura y duración.

Tabla 9. Escala de olor para el proceso de compostaje.

Tabla 10. Escala de color para el proceso de compostaje.

Tabla 11. Diseño experimental para datos de temperatura, pH y humedad.

Tabla 12. Diseño experimental para datos de temperatura, pH, humedad, olor y color.

Tabla 13. Diseño experimental para datos de IG.

Tabla 14. Resultados del ensayo de fitotoxicidad a 15 días de cultivo de semillas de lechuga. Sg: Semillas germinadas, PGR: Porcentaje de germinación, CRR: Crecimiento radicular relativo, IG: Índice de germinación. Los tratamientos con las mismas letras no tienen una diferencia significativa.

Tabla 15. Resumen de análisis de carbono, nitrógeno total y relación C/N de cada tratamiento (ANEXO 1).

Listado de figuras

Figura 1. Proceso de biodegradación de la lignina por hongos de pudrición blanca.

Figura 2. Diseño de sistema de compostaje preliminar. a) Estructura cilíndrica para compostera tipo balde. b) Esquema de distribución de las unidades a compostar, la fila superior corresponde a los tratamientos con abono porcino (P-AP) y la inferior a los tratamientos con abono bovino (P-AB).

Figura 3. Distribución de materiales a compostar dentro del reactor tipo balde. SGH: Sustrato gastado de hongo ostra.

Figura 4. Distribución de las unidades de compostaje en pila.

Figura 5. Distribución de materiales a compostar dentro del reactor en pila.

Figura 6. Puntos de control de temperatura, pH y humedad dentro de unidades. a) Sistema tipo balde. b) Sistema en pila.

Figura 7. Distribución del sistema de compostaje preliminar tipo balde.

Figura 8. Degradación de material orgánico en 10 semanas del tratamiento P50-AP. a) Material a compostar al día 3. b) Compost degradado al final del proceso.

Figura 9. Cambio de temperatura respecto al tiempo. a) Variación de temperatura del bloque tratado con abono bovino. b) Variación de temperatura del bloque tratado con abono porcino.

Figura 10. a) Variación de pH en el bloque P-AB, b) Variación de pH en el bloque P-AP, c) Variación del porcentaje de humedad en P-AB y d) Variación de humedad en P-AP.

Figura 11. Proceso de descomposición de materia orgánica de los tratamientos T-AP. a) Material a compostar al primer día. b) Material degradado a las 6 semanas. c) Material resultante de degradación a las 12 semanas.

Figura 12. a) Variación de temperatura de los tratamientos T-AB, b) Variación de temperatura de los tratamientos T-AP y c) Prueba ANOVA del efecto del bloque y el tratamiento sobre la temperatura.

Figura 13. Variación del pH para los tratamientos T-AB (a) y T-AP (b). c) Prueba ANOVA del efecto del tratamiento y bloque aplicados a las unidades a compostar.

Figura 14. Variación de la humedad de las unidades de compostaje de los tratamientos T-AB (a) y T-AP (b). c) Prueba Kruskal-Wallis para la comparación muestral de las unidades a compostar.

Figura 15. Variación de olor respecto al tiempo en los tratamientos con T-AB (a) y T-AP (b). c) Prueba Kruskal-Wallis para la comparación muestral de las unidades a compostar.

Figura 16. Variación del color de las unidades a compostar con estiércol bovino (a) y porcino (b). c) Prueba ANOVA para la influencia del bloque y tratamiento en las unidades a compostar.

Figura 17. Germinación y crecimiento radicular para semillas de lechuga cultivadas en T40-AP.

Figura 18. a) Porcentaje de germinación (PGR), b) Crecimiento radicular relativo (CRR), c) Índice de germinación (IG) y d) Prueba ANOVA para el efecto del tratamiento y bloque sobre el índice de germinación.

Resumen

Actualmente, el suelo cultivable ha disminuido progresivamente debido a la labranza insostenible y el uso de fertilizantes químicos, provocado su erosión (FAO, 2011). Para recuperar su estructura se implementan técnicas como el compostaje. El uso de sustrato gastado de hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*) (SGH) en el compost resultante eleva su potencial enzimático y nutricional, por tanto, el objetivo de este estudio fue elaborar compost a base de SGH complementado con estiércol porcino (AP) y bovino (AB).

Se construyó un sistema de compostaje en pilas, empleando paja y porcentajes en peso de SGH de 20% y 40%, tratados con AP y AB, con una duración del proceso de doce semanas. Se evaluó temperatura, pH, humedad, olor, color, Índice de germinación (IG) y relación carbono/nitrógeno (C/N). El compost resultante fue homogéneo y degradado casi en su totalidad, de olor neutro y tono oscuro. Los tratamientos con AB y AP tuvieron relaciones mínimas de C/N de 16 y 20, respectivamente. Los ensayos con 40% SGH presentaron valores de IG > 150%. La temperatura mostró un rango de valores inferiores a lo descrito bibliográficamente, deduciendo una inactivación incompleta del sistema. El pH tuvo comportamiento ácido durante las primeras semanas y neutro hasta finalizar el proceso; por otro lado, la humedad se mantuvo en un rango óptimo de 40%-65%.

En conclusión, el tipo de estiércol y el porcentaje de SGH son estadísticamente significativos (ANOVA y LSD, $p < 0,05$) para el resultado del proceso. Las unidades con mayor SGH tienen mejor desarrollo físico, mientras que los tratamientos con estiércol porcino presentan mayor calidad nutricional, por tanto, el tratamiento empleado con 40% de SGH y estiércol porcino (T40-AP) es un potencial suplemento para suelos de cultivo.

Palabras clave:

- **COMPOSTAJE**
- **COMPOST**
- **PLEUROTUS OSTREATUS**

Abstract

Currently, arable land has progressively decreased due to unsustainable tillage and the use of chemical fertilizers, causing its erosion (FAO, 2011). To recover its structure, techniques such as composting are implemented. The use of spent oyster mushroom substrate (*Pleurotus ostreatus*) (SGH) in the resulting compost increases its enzymatic and nutritional potential, therefore, the objective of this study was to produce SGH-based compost supplemented with pig manure (AP) and bovine manure (AB).

A heap composting system was built, using straw and SGH weight percentages of 20% and 40%, treated with AP and AB, with a process duration of twelve weeks. Temperature, pH, moisture, odor, color, germination index (IG) and carbon/nitrogen ratio (C/N) were evaluated. The resulting compost was homogeneous and degraded almost in its entirety, with a neutral smell and a dark tone. The AB and AP treatments had minimal C/N ratios of 16 and 20, respectively. The trials with 40% SGH had $IG > 150\%$ values. The temperature showed a range of values lower than that described in the literature, deducing an incomplete inactivation of the system. The pH had an acid behavior during the first weeks and neutral until the end of the process; on the other hand, the moisture was kept in an optimal range of 40%-65%.

In conclusion, the type of manure and the percentage of SGH are statistically significant (ANOVA and LSD, $p < 0,05$) for the result of the process. Units with higher SGH have better physical development, while pig manure treatments have higher nutritional quality, therefore, the treatment used with 40% SGH and pig manure (T40-AP) is a potential supplement for farm soils.

Keywords:

- **COMPOSTING**
- **COMPOST**
- **PLEUROTUS OSTREATUS**

Capítulo I: Introducción

Formulación del problema

Desde siempre el suelo ha sido considerado como un recurso natural indispensable no renovable a escala de tiempo humana, ya que su recuperación no corresponde a lapsos de tiempos cortos, por lo que su cuidado es prioritario. El suelo es una mezcla compuesta de abundante material orgánico, nutrientes, minerales y gases, y es el ambiente donde se desarrollan millones de macro y microorganismos (X. Liu *et al.*, 2010). Proporciona un sustrato fértil para el desarrollo y mantenimiento de los seres vivos, además de ser la principal fuente de la producción de alimentos (Nortcliff *et al.*, 2011). Las principales ventajas de mantener un suelo saludable corresponden a la producción sostenida de alimentos, la descomposición de desechos, el almacenamiento de calor, el secuestro de carbono y el intercambio de gases. Alrededor del mundo, aproximadamente solo el 11% del suelo puede ser utilizado para el cultivo de alimento, el cual hoy en día se ha visto afectado por una inadecuada gestión, que ha provocado la erosión de la tierra, su contaminación y su eminente destrucción (FAO, 2011).

La erosión del suelo se refiere a la remoción desmesurada de la capa superficial de la tierra por motivo de labranza excesiva, por el agua o el viento (FAO, 2015). Actualmente, la degradación de la tierra cultivable es uno de los problemas ambientales más críticos, ya que las áreas de tierra destinadas a la agricultura corren el riesgo de ser improductivas si el desgaste del suelo continúa a ritmo acelerado (Jain & Kothiyari, 2000). Los principales afectados por las consecuencias de este fenómeno son aquellos países donde la agricultura juega un importante papel en la economía de la población. Algunos de los problemas más visibles de la erosión incluyen la pérdida de la capa fértil del suelo, la sedimentación de fuentes hídricas, la eutrofización de las masas de agua y la pérdida de la biodiversidad acuática (Onyando *et al.*, 2005).

El daño por erosión provoca una disminución de producción debido al deterioro de las propiedades físicas y químicas del suelo como la pérdida de carbono y nutrientes esenciales, la alteración en la tasa infiltración y la retención de agua (X. Liu *et al.*, 2010). Los efectos en la producción varían dependiendo del tipo de suelo y la profundidad de la capa superior del mismo. Ionut (2018) menciona que, existe una relación directa entre la producción de cultivos y la profundidad de la capa superficial del suelo. A medida que la capa de suelo se deteriora, se pierde la capacidad de absorción de agua lluvia, provocando escorrentía y consecuentemente, menor disponibilidad de agua para los cultivos (Al-kaisi, 2008).

Algunas prácticas agrícolas insostenibles como la labranza excesiva y profunda, la reducción entre los períodos de siembra, el uso de tierras marginales como las pendientes, y el uso indiscriminado de fertilizantes químicos, si bien han aumentado el rendimiento en la producción, también han exigido al límite a los suelos cultivables, provocando la pérdida de su resiliencia (Doan *et al.*, 2015). Se ha identificado que las tierras de cultivo intensivo provocan de 100-1000 veces más erosión que las tasas naturales, generando un desequilibrio marcado entre los procesos de degradación y formación de suelo conocidos (FAO, 2015).

La búsqueda para mantener la demanda en la producción de alimentos y la fertilidad de los suelos, desembocan en el uso continuo de fertilizantes químicos, que son sustancias producidas de forma artificial a nivel industrial. En su mayoría son solubles en agua y tienen altas concentraciones de micro y macronutriente disponibles. Sin embargo, su excesivo uso, además de ser costoso para los pequeños productores, genera un serio problema de contaminación ambiental, ya que estos fertilizantes se dispersan en el aire y en aguas subterráneas, alterando el ecosistema y considerándose como un riesgo para la salud humana (Suhag, 2016).

El uso frecuente de fertilizantes químicos en sustitución de los orgánicos, sumado a la labranza excesiva a través de maquinaria pesada y el arado cada vez a mayores profundidades, provocan la compactación del suelo. Esta problemática afecta negativamente todas las propiedades físicas, químicas y biológicas de la tierra (Hamza & Anderson, 2005). Las consecuencias en la producción de cultivos incluyen una fuerte resistencia al arado, falta de aireación, reducción de permeabilidad y conductividad hidráulica, pérdida de la capa superficial fértil del suelo, restricción en el crecimiento de raíces, reducción de porosidad y una reducción alarmante de la actividad biológica (Massah & Azadegan, 2016).

Ecuador es un país netamente agrícola, donde se ha identificado que a nivel nacional, 5,20 millones de hectáreas están destinadas al sector agropecuario. Sin embargo, a pesar que históricamente la agricultura ha sido un pilar fundamental en la economía del país, el sector agrícola se ha visto afectado por la falta de tecnologías y capacitación de los agricultores (Montalvo, 2013). En 2020, de los productores investigados, el 53,00% manifiesta tener únicamente una instrucción básica; mientras que el 14,83% menciona que no poseen instrucción formal, únicamente conocimiento empírico (INEC, 2021).

De acuerdo con el INEC (2020), en el 64,6% de sembríos transitorios a nivel nacional, se ha utilizado el método de quema de rastrojos para preparar el suelo, controlar malezas y eliminar restos de cosechas previas. Esta práctica presenta una reducción del contenido de materia orgánica y genera emisiones de gases contaminantes como óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4). Además, en 2019, alrededor del 56,5% de sembríos permanentes fueron objeto de aplicación de fertilizantes y plaguicidas de origen químico, mientras que únicamente en el 3,0% se usaron insumos de origen orgánico. Debido a esto, para aumentar el rendimiento de sus cultivos, los agricultores han generado una dependencia del uso de agroquímicos (Yaguana *et al.*, 2019).

Luego de años de investigación, a pesar de que existen soluciones técnicas para la mayoría de problemas, el deterioro del suelo se ha incrementado a medida que aumenta la demanda en la producción agrícola. La intensificación inteligente de los sistemas agrícolas propone el uso de técnicas que procuren disminuir los efectos nocivos al ambiente, permitiendo aumentar la conservación de carbono orgánico en el suelo, la eficiencia del agua y biodiversidad, reduciendo a la vez el riesgo de erosión y deterioro de la tierra (Govers *et al.*, 2017).

Justificación del problema

El incremento de la fertilidad del suelo y la disminución de la erosión es aún un reto para la región, por lo que la implementación de tecnologías de mejoramiento de suelos en la agricultura urbana, rural y producción agrícola familiar, se ha vuelto indispensable. La importancia de la producción familiar juega un papel importante en el ámbito alimentario y nutricional, tanto para suministrar alimentos, como para la generación de empleo dirigido a la población de bajos recursos, así como por su contribución al desarrollo nacional y a la construcción de un ambiente urbano más saludable. Sin embargo, la producción agrícola familiar se ve limitada por la falta de suelo de calidad, sobre todo en las ciudades donde no hay acceso a tierras para siembra (Román *et al.*, 2013).

Una alternativa sencilla y de bajo costo a la escasez de suelos de buena calidad para la producción agrícola es el desarrollo de abonos orgánicos (compost), como fertilizante para suelos pobres en nutrientes. El compost recicla desechos orgánicos, formando abono de elevada calidad a través de la oxidación controlada de los residuos utilizados (Ramos & Terry, 2014). De esta forma se reduce la contaminación por la excesiva producción de desechos y el costo de fertilizantes químicos usados regularmente. Además, puede ser usado como sustrato o cobertura, para mantenimiento

de los niveles originales de materia orgánica del suelo y complemento o reemplazo de los fertilizantes inorgánicos (Martínez *et al.*, 2013).

De acuerdo con Cogger (2005), los suelos con aplicación de enmiendas orgánicas como el compost han presentado efectos positivos respecto a la estabilidad de los agregados, la densidad aparente, porosidad y tasas de infiltración. Sin embargo, la finalidad no es un enriquecimiento nutricional inmediato del suelo, sino el mejoramiento progresivo de su estructura y el equilibrio de nutrientes (Sánchez, 2017). A pesar que se ha demostrado que la fertilización orgánica mejora la calidad del suelo, como es el caso del uso del estiércol animal, surge la interrogante de si una enmienda orgánica tiene un impacto en el rendimiento igual o superior que los fertilizantes químicos, por lo que es necesario un análisis tanto del sistema a utilizar como de las características del sitio objetivo (Doan *et al.*, 2015).

El residuo del sustrato para el crecimiento de hongos ha empezado a representar un problema ambiental, debido a que es un producto de gran demanda y su volumen de desechos va en aumento (Kamarudzaman *et al.*, 2013). El uso de estos residuos de hongos de podredumbre blanca como complemento de compost provee un aumento significativo de nutrientes y de la calidad en general, al usar principalmente residuos de la degradación de madera como sustrato (Luna *et al.*, 2013). *Pleurotus ostreatus* tiene la capacidad de tolerar una amplia gama de condiciones ambientales, que involucran nutrientes, pH y contenido de humedad y, lo que es más importante, puede usar lignocelulosa para su crecimiento y para la formación de complejos enzimáticos. De hecho, este tipo de hongos de pudrición blanca pueden ejercer un efecto positivo sobre el crecimiento de otros microorganismos autóctonos, mejorando la porosidad y la capacidad de retención de agua del suelo, y facilitando la degradación total de los contaminantes recalcitrantes (Jurado *et al.*, 2011).

El uso de estiércoles de origen animal, tienen alto valor agronómico, ya que históricamente se han usado como abono orgánico sin daños ambientales, mejorando la producción agrícola. Los microorganismos propios de estas sustancias aportan a la descomposición de la materia orgánica provocando un aumento de la capa fértil arable. Además, representa una menor inversión en comparación con los fertilizantes químicos (Moreno & Cadillo, 2018), por lo que su potencial uso en combinación con los residuos de podredumbre blanca pueden ayudar al mejoramiento de la calidad de sistemas de compostaje para su uso en suelo de cultivos.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Elaborar abono orgánico (compost) a partir de desechos de cultivo de hongos ostra (*Pleurotus ostreatus*) y estiércol porcino y bovino.

Objetivos específicos

- Dimensionar un sistema de compostaje, así como la cantidad de elementos a utilizar de acuerdo a las variables descritas bibliográficamente.
- Evaluar la degradación aerobia de los compuestos a través de la medición de las variables temperatura, pH y humedad.
- Determinar el valor nutricional que proveen los desechos de hongos ostra en cada mezcla de compost, al medir Carbono, Nitrógeno, Fósforo y Minerales.
- Identificar la mezcla de compost con mejores cualidades físicas y nutricionales para ser utilizada en cultivos, a través de la evaluación de características organolépticas y ensayos de fitotoxicidad.

Hipótesis

H_0 : El compost resultante al usar desechos de cultivo de hongos ostra (*Pleurotus ostreatus*) como material de enmienda tiene mayor calidad nutricional que la de un compost sin la adición de residuos de hongos ostra.

H_1 : El compost resultante al usar desechos de cultivo de hongos ostra (*Pleurotus ostreatus*) como material de enmienda tiene menor calidad nutricional que la de un compost sin la adición de residuos de hongos ostra.

Capítulo II: Marco teórico

Suelo

El suelo es una mezcla física, química y biológicamente heterogénea formada aproximadamente de 5% de materia orgánica, 45% de componente minerales y 50% de espacios porosos, acompañado de una innumerable cantidad de microorganismos (CASFS, 2021). Se forma en la superficie terrestre y tiene la capacidad de sustentar la vida vegetal y animal del planeta (Keesstra *et al.*, 2016). Su vitalidad se ha visto afectada por la mano del hombre, generando erosión, compactación, contaminación por insumos químicos para control de plagas y alteración del ciclo de los nutrientes (Kuramae *et al.*, 2011).

Erosión del suelo

La erosión es la eliminación de la capa superior de suelo más fértil por diferentes agentes, generalmente el agua, el viento y el movimiento de masas, provocando un deterioro a largo plazo. Este fenómeno actualmente es causado por el hombre, haciendo uso indiscriminado y no controlado de la tierra en la agricultura, y otras perturbaciones como, deforestación, sobrepastoreo, incendios o minería. Esta pérdida de suelo puede causar severos impactos económicos, sociales y políticos, ya que afecta directamente a la producción de los cultivos (Pereira *et al.*, 2017).

La alimentación de la creciente población mundial con preferencias alimentarias hacia los productos pecuarios ha aumentado la presión sobre los suelos fértiles. La Alianza Mundial por el Suelo liderada por la FAO informó que anualmente se erosionan 75 mil millones de toneladas de suelo de las tierras cultivables alrededor del mundo, equivalente a pérdidas económicas estimadas de 400 mil millones de dólares por año (Borrelli *et al.*, 2017).

Hoy en día, las tasas de degradación del suelo son mucho mayores que las tasas de formación, y esta degradación amenaza directamente la capacidad de producción de

alimentos en ciertas partes del mundo, incluso a corto plazo. Los impactos no solo afectarían por el desgaste de la tierra y la pérdida de fertilidad, sino también por un importante número de efectos fuera del sitio, por ejemplo, la sedimentación y eutrofización, impacto sobre el clima debido a cambios en el ciclo del carbono del suelo, ya que la erosión puede aumentar o disminuir las emisiones de CO₂ (Nearing *et al.*, 2017).

Materia Orgánica

La materia orgánica corresponde a un grupo de compuestos conformados principalmente por carbono, que se han originado a partir de materiales de origen animal y vegetal parcial o completamente descompuestos, incluye también las sustancias sintetizadas químicamente y aplicadas intencionalmente en forma de pesticidas orgánicos. Los suelos fértiles deben contener del 2% al 8% de materia orgánica, sin embargo, la mayoría de los suelos actualmente contienen menos del 2% (Pettit, 2020). En suelos ácidos, la materia orgánica se presenta en forma de desechos vegetales y ácidos fúlvicos. Mientras que, en suelos neutros y alcalinos, la materia orgánica se encuentra en forma de ácidos húmicos y huminas (Meléndez & Soto, 2003).

Humus

Se define como un complejo variable de compuestos orgánicos que tienen alto contenido de carbono, tiene un color marrón a negro característico. El humus es el principal componente de materia orgánica del suelo, representando del 65% al 75% del total, es un producto de la descomposición de sustancias orgánicas por medio de organismos descomponedores como hongos y bacterias (Pettit, 2020). Tiene una alta estabilidad por lo que se degrada lentamente en condiciones naturales y aporta grandes cantidades de nutrientes al mismo, asumiendo un importante papel como componente de fertilidad (Julca *et al.*, 2006).

Ácidos Húmicos

Corresponden a una mezcla de ácidos orgánicos alifáticos débiles y aromáticos insolubles en agua en condiciones ácidas, pero sí solubles cuando se trata de condiciones alcalinas. Los ácidos húmicos son una fracción de sustancias húmicas que tienden a precipitar en una solución cuando el pH se encuentra por debajo de 2 (Canellas *et al.*, 2015). En promedio, el 35% de las moléculas de ácido húmico son anillos aromáticos de carbono, mientras que los componentes restantes se encuentran en forma de cadenas alifáticas. Los polímeros de ácido húmico se unen fácilmente a los minerales arcillosos para formar complejos arcillosos orgánicos estables. Los ácidos húmicos forman fácilmente sales con oligoelementos inorgánicos. Un análisis de extractos de ácidos húmicos de origen natural revelará la presencia de más de sesenta elementos minerales diferentes presentes. Estos oligoelementos están ligados a moléculas de adición húmica en una forma que puede ser utilizada fácilmente por varios organismos vivos. Como resultado, los ácidos húmicos funcionan como importantes sistemas de intercambio iónico y quelación (Rupiasih, 2005).

Ácidos Fúlvicos

Son una mezcla de ácidos orgánicos alifáticos y aromáticos débiles que sí son solubles en todas las condiciones de pH. Tienen una amplia variabilidad de composición y forma. Los ácidos fúlvicos tienen tamaños más pequeños que los ácidos húmicos. Contienen aproximadamente una cantidad de oxígeno dos veces mayor que la de los ácidos húmicos. Son mucho más reactivos químicamente ya que tienen una gran cantidad de grupos carboxilo (COOH) e hidroxilo (COH), por lo que, la capacidad de intercambio de los ácidos fúlvicos es más del doble que la de los ácidos húmicos. Esta alta capacidad de intercambio se debe al número total de grupos carboxilo (COOH) presentes (S. Yang *et al.*, 2013).

El tamaño relativamente pequeño de las moléculas de ácido fúlvico les permite ingresar fácilmente a las raíces, tallos y hojas de las plantas, permitiendo el transporte de oligoelementos desde la superficie de la planta hasta los tejidos vegetales más internos. Son ingredientes indispensables de los fertilizantes de alta calidad, ya que son los compuestos quelantes que contienen carbono más eficaces que se conocen. Son compatibles con las plantas, por lo que no son tóxicos cuando se aplican en concentraciones relativamente altas (Meléndez & Soto, 2003).

Compostaje

El compostaje es considerado como un proceso biológico de fermentación en estado sólido, llevado a cabo por microorganismos termófilos fundamentalmente de tipo aeróbico, mediante condiciones controladas de humedad, temperatura y aireación. En este proceso se transforman residuos de carácter orgánico en productos más estables que puede ser utilizados como enmienda orgánica para la mejoración y recuperación suelos (Escobar *et al.*, 2012). Los microorganismos aerobios transforman materia orgánica en biomasa celular y en compuestos oxidados, siguiendo reacciones exotérmicas que producen un incremento de la temperatura del medio y la consecución de otros procesos. El proceso catalizado por estos microorganismos en condiciones controladas recibe el nombre de compostaje y, a pesar de que no ha sido considerado como un sistema de valorización energética, tiene lugar gracias a la transformación de la energía contenida en la materia orgánica, para dar lugar a compuestos finales de utilidad agronómica. Por tanto, tiene un interés indudable desde el punto de vista de la gestión de residuos orgánicos (Campos & Flotats, 2005). El objetivo principal de un compost no es enriquecer inmediatamente los suelos cultivables con elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de plantas como nitrógeno, fósforo y potasio, sino contribuir de forma progresiva a la mejora de la estructura del suelo y ayudar a la movilización de

nutrientes a las plantas, lo que conduce a un equilibrio del suelo más adecuado (Sánchez, 2017).

Técnicas de compostaje

Los sistemas de compostaje se dividen en cerrados y abiertos. Los sistemas abiertos son aquellos que se construyen al aire libre, y los cerrados los que colocan en recipientes o bajo techo (Román *et al.*, 2013).

Sistemas abiertos o en pilas. Generalmente se utiliza cuando existe una cantidad de materia orgánica abundante (sobre 1m³). Existe una amplia variedad de formación de pilas, variando así el volumen de estas, su forma, la disposición y el espacio entre ellas, sin embargo todas las metodologías coinciden en que debe haber alternancia entre capas de distinto material, con el objetivo de mantener una relación C/N estable y un correcto manejo de la temperatura y humedad.

Sistemas cerrados o en recipiente. Este método es frecuentemente usado a bajo nivel de producción. Esta técnica tiene varias características que favorecen su implementación: evita la acumulación de lluvia, protege al material de vientos fuertes, facilidad en el volteo, facilita la extracción de lixiviado y evita la intervención de agentes externos al material en descomposición. La desventaja de este sistema es que puede ser difícil regular la temperatura, por lo que normalmente se coloca tierra al recipiente (hasta un 10%) que actúa como regulador de temperatura.

Condiciones para el diseño de un compostaje

De acuerdo con Silbert (2018), el diseño de un sistema de compostaje debe regirse a los siguientes condicionantes básicos para permitir el desarrollo óptimo de proceso:

Aislamiento de la lluvia y el sol directo. Si el sistema es abierto, la parte superior debe tener una cubierta no hermética, que actúe como barrera física al ingreso de agua de lluvia y sol directo.

Barrera física. En sistemas abiertos, hay que evitar el ingreso de roedores o agentes externos al proceso, se puede incluir barreras físicas con materiales de plástico, metal, madera o lona.

Drenaje de lixiviados. El proceso de compostaje tiende a generar líquido que requiere de su drenaje y eliminación, por lo que el sistema debe tener la facilidad para liberar dichos líquidos o incluso el exceso de agua de riego.

Aireación. La oxigenación continua del proceso aerobio debe realizarse periódicamente a través del volteo manual, procurando el desarrollo de los microorganismos aerobios que descomponen los residuos orgánicos.

Ventilación. Los sistemas de compostaje no deben ser herméticos ya que corren riesgo de generar un ambiente anaerobio. Se requiere ventilación para la eliminación de gases como CO₂, producto de la degradación de los residuos y para el ingreso de oxígeno a través de los poros.

Separación por módulos. Si se tienen más de dos sistemas de compostaje, no es recomendable una configuración vertical ya que puede darse una contaminación cruzada. Si se establece una configuración horizontal, cada compostaje deberá tener una separación considerable, para evitar mezclar un compost maduro con uno inmaduro.

Fases de compostaje

El compostaje es un proceso aeróbico (presencia de oxígeno) biológico que permite la transformación de materiales orgánicos en un producto estable, a través de un adecuado control de temperatura y humedad. Este proceso corresponde a un conjunto de procesos metabólicos de microorganismos que priorizan el uso de carbono y nitrógeno

para producir biomasa. Los procesos metabólicos están caracterizados por la generación de calor, pudiéndose diferenciar cinco fases en función del cambio de temperatura.

Fase de latencia. Considerada como la etapa inicio, ocurre durante la construcción de la pila hasta que se registra un aumento de temperatura, generalmente la esta etapa empieza con una temperatura ambiente. Cuando se empieza con material fresco, el cambio de temperatura será notorio, si son correctos los balances de carbono, nitrógeno, pH y concentración oxígeno, entonces la duración de esta etapa será aproximadamente de 24 a 72 horas (Sztern & Pravia, 1999).

Fase Mesófila. El material inicial del proceso de compostaje aumenta su temperatura en pocos días, aproximadamente hasta los 45°C. La actividad microbiana utiliza el material orgánico como fuente de carbono y nitrógeno, generando fermentaciones por parte de la microflora mesófila, junto con procesos de oxidación aeróbica y nitrificación, produciendo calor. La degradación de compuestos solubles, como azúcares, genera ácidos orgánicos y, por lo tanto, el pH tiende a disminuir a 4,0 o 4,5. Esta fase dura alrededor de dos y ocho días, tiempo en el cual, el proceso será afectado directamente por la humedad y aireación (W. Bohórquez, 2019) (Román *et al.*, 2013).

Fase Termófila o de Higienización. El aumento progresivo de temperatura al superar los 45°C provoca que los microorganismos mesófilos que se desarrollan a temperaturas medias sean reemplazados por bacterias termófilas, las cuales crecen a altas temperaturas (entre 60 y 70° C). Estas bacterias facilitan la descomposición de materiales más complejos de carbono como la celulosa, ceras y la lignina. Se produce la transformación del nitrógeno en amoníaco, provocando que el pH del medio aumente. Este proceso dura entre unos días hasta meses, dependiendo del material inicial, las condiciones climáticas y del lugar (Camacho, 2009).

Durante esta fase, el calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella* spp., además de huevos de insectos, esporas

de hongos, semillas de maleza y elementos biológicos no deseados. Los cambios durante este período se evidencian por emanaciones de vapor de agua y producción de CO₂. Al finalizar esta etapa se consumen todos los nutrientes y fuentes de carbono y nitrógeno, provocando que los grupos de bacterias termófilas entren en fase de muerte (Sztern & Pravia, 1999).

Fase de Enfriamiento o Mesófila II. Esta fase dura varias semanas en las cuales, la temperatura del sistema de compostaje baja hasta los 40-45 °C y el pH se torna ligeramente alcalino. Consumidas las fuentes de carbono y nitrógeno y, al descender la temperatura, los organismos mesófilos toman nuevamente el control del proceso, continuando con la degradación de polímeros como la celulosa (Román *et al.*, 2013).

Fase de Maduración. Esta fase tiene una duración de varios meses donde la temperatura desciende a la ambiental. Durante este período, la materia orgánica más resistente comienza a biodegradarse, además se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de dichos compuestos hasta la formación de ácidos húmicos y fúlvicos, finalmente, la materia orgánica tendrá una consistencia homogénea y estable (Camacho, 2009).

Variables de medición

Los parámetros a evaluar durante el proceso de compostaje se pueden dividir en dos grupos. Parámetros de seguimiento, los cuales serán medidos y modificados durante todo el proceso según se requiera, considerando los intervalos correctos de sus valores durante cada fase. Parámetros relativos, son aquellos que están relacionados directamente con la naturaleza del sustrato y, serán medidos y adecuados en la fase inicial del proceso (Bueno *et al.*, 2008) (W. Bohórquez, 2019) (Gómez, 2006).

Parámetros de seguimiento

Temperatura. La temperatura inicial del material a compostar es la misma, sin embargo, al crecer y empezar el proceso de degradación, los microorganismos producen calor, provocando el aumento de la temperatura del sistema. Debido a esto, se la considera una variable que diferencia muy bien las fases que sigue el compostaje, ya que se ha comprobado que las variaciones de temperatura afectan directamente la degradación.

Durante un proceso aerobio, se pueden observar tres cambios importantes de temperatura: de la fase de latencia (T ambiental) a la fase mesófila inicial ($T < 45^{\circ}\text{C}$); de la fase mesófila inicial ($T < 45^{\circ}\text{C}$) a la fase termófila ($T > 45^{\circ}\text{C}$) y; de la fase termófila ($T > 45^{\circ}\text{C}$) a la fase mesófila final ($T < 45^{\circ}\text{C}$). Los microorganismos que actúan en la degradación son de dos tipos en función de su temperatura de crecimiento, los microorganismos mesófilos cuyo metabolismo es óptimo a $15-40^{\circ}\text{C}$ y los microorganismos termófilos que actúan cuando la temperatura ha alcanzado los $40-70^{\circ}\text{C}$.

Humedad. Al ser un proceso biológico, el compostaje requiere de agua para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que el agua permite el transporte de sustancias solubles para el mantenimiento y crecimiento celular. La humedad de la materia a compostar no debe ocupar totalmente los poros de dicha masa, para que la circulación del oxígeno sea la mayor posible y a su vez, los gases producidos puedan ser expulsados del interior del sistema.

La humedad óptima para el desarrollo microbiano es de $50-70\%$, ya que la actividad biológica disminuye cuando la humedad es menor al 30% ; mientras que arriba del 70% , el agua ocupa los poros entre partículas e impiden el paso del aire, reduciendo la transferencia de oxígeno y generando un ambiente anaerobio. Una adecuada aireación puede solucionar el exceso de humedad.

pH. Al igual que la temperatura, el pH influye en la supervivencia de los microorganismos, ya que cada grupo se multiplica y crece a un pH óptimo. Esta variable depende de los materiales iniciales e irá cambiando según las fases del proceso, durante la fase mesófila el pH disminuye debido a la formación de ácidos orgánicos por parte de los microorganismos, que degradan la materia orgánica más biodegradable. En la fase termófila, se presenta una alcalinización progresiva del sistema, producto de la generación de amoníaco y la disminución de los ácidos orgánicos. En la fase final el pH tiende a ser neutro ya que se han formado sustancias húmicas que actúan como tampón.

Aireación. La aireación es una de las variables más importantes ya que el ser un proceso biológico, es necesario asegurar la distribución de oxígeno por todo el sistema para que los microorganismos aerobios crezcan y se multipliquen. Las secciones más externas de un sistema de compostaje tienen una abundante aireación y a mayor profundidad del compostaje, el porcentaje de aire va decayendo. Un déficit de aire puede provocar el reemplazo de los microorganismos aerobios por anaerobios y el proceso de descomposición sería más retardado. Por otra parte, el exceso de ventilación provoca una disminución de la temperatura y desecación de la materia, reduciendo así la actividad metabólica.

Parámetros relativos

Tamaño de partícula. La optimización del proceso depende del tamaño inicial de las partículas de la materia orgánica a compostar, ya que mientras menor sea el tamaño, mayor será la superficie de contacto para los microorganismos y su acción de degradación será más rápida y eficiente. Sin embargo, si el material es demasiado pequeño se corre el riesgo de compactación y pérdida de porosidad, por consecuencia la aireación se vería afectada provocando un ambiente anaerobio. Las dimensiones óptimas recomendadas varían entre 2 y 5 cm.

Relación C/N (Carbono/Nitrógeno). El carbono y el nitrógeno son dos de los nutrientes principales requeridos por los microorganismos participantes en el compostaje. Los microorganismos usan carbono tanto para la energía como para el crecimiento, mientras que el nitrógeno es esencial para la reproducción y construcción de proteínas. Una proporción apropiada de C/N generalmente asegura que los otros nutrientes requeridos estén presentes en cantidades adecuadas.

Durante el compostaje se busca la mayor retención de carbono y nitrógeno, por lo que se recomienda una relación teórica óptima C/N de 25–35 en la materia orgánica inicial, es decir, 25-35 partes de carbono por una de nitrógeno. Si la relación C/N supera a 40/1, la actividad biológica disminuye y la degradación se ralentiza. Para relaciones C/N menores a 20/1, el carbono disponible se utiliza completamente sin estabilizar todo el nitrógeno, lo que puede conducir a la producción de un exceso de amoníaco y olores desagradables. Para proporciones superiores a 40/1, no hay suficiente N disponible para el crecimiento de microorganismos y el proceso de compostaje se ralentiza drásticamente. La relación C/N para un compost maduro debe ser <20 (Pace *et al.*, 1995).

Materia orgánica. A medida que avanza el proceso de degradación, la cantidad de materia orgánica tiende a disminuir debido a su mineralización, además de la pérdida de carbono en forma de CO₂, la disminución de materia representa alrededor del 20% de la masa inicial. Esta pérdida de materia se da en dos etapas. Durante la primera etapa de consumen rápidamente los carbohidratos de cadenas largas, dando como producto cadenas más cortas de carbono, para reagruparse posteriormente y generar sustancias húmicas. Para la segunda etapa se da la descomposición de los compuestos menos lábiles como las ligninas. La velocidad de degradación de la materia orgánica varía en dependencias de su naturaleza física y química, de los microorganismos y las condiciones físico-químicas del proceso.

Evaluación de la madurez del compost. El grado de maduración del compost es un parámetro muy importante para evaluar la calidad del producto. La madurez representa el estado de degradación, transformación y síntesis microbiana que se ha obtenido del material inicial y, se relaciona directamente con su potencial aplicación al suelo (García *et al.*, 2014). El compost maduro es un producto estabilizado y saneado que contiene los nutrientes (sustancias húmicas) fácilmente asimilables para las plantas, a simple vista se asemeja a tierra suelta, ligeramente húmeda, de color marrón oscuro o negro, de olor agradable y temperatura similar a la ambiental, su textura es homogénea y los constituyentes iniciales no son reconocibles (Dickerson, 2005).

Un compost inmaduro tienen una temperatura alta, existe liberación de amoníaco por lo que tiene un fuerte, además, aún se observan los componentes de la materia orgánica inicial (Mazzarino, 2013). Los métodos para definir la madurez del compost se basan en la combinación de diferentes métodos de estudios, desde los más simples hasta los más laboriosos, entre estos se incluyen el crecimiento de plantas, ensayos de fitotoxicidad, estudios de germinación de semillas, desarrollo de olores, color, granulometría, entre otros (Iglesias *et al.*, 2008).

Beneficios del compostaje. El compostaje es el único método que permite la recuperación de los nutrientes e incorporarlos completamente al ambiente. Este beneficio afecta directamente al suelo, ya que aporta materia orgánica, mejora la estructura, protege la superficie fértil de la erosión y mantiene la humedad.

El reciclaje de residuos domésticos por medio de compostaje representa una opción factible para reducir el volumen de desechos municipales; recalcando su bajo costo de beneficio y el evidente aporte ambiental, ya que es un proceso que puede realizarse tanto a nivel industrial como a nivel individual. Por otro lado, se puede utilizar el compost como reemplazo de fertilizantes químicos, disminuyendo la contaminación por aerosoles (Alcolea & González, 2000).

De forma general, los beneficios ambientales que proporciona un compost de calidad son: suministro de nutrientes y el secuestro de carbono, supresión de plagas y enfermedades, mejoramiento de la estructura suelo, flujo de nutrientes que genera biodiversidad microbiana y vegetal, calidad nutricional y rendimiento de cultivos.

Finalmente, la ventaja más sobresaliente recae en que, la adición de compost al suelo combate la erosión y protege la capa fértil del mismo, mejorando la porosidad y los índices de infiltración (Martínez *et al.*, 2013).

Hongos ostra (*Pleurotus ostreatus*)

P. ostreatus es un hongo lignícola saprófito, cuyo nombre común es hongo ostra. Pertenece a la clase Basidiomycetes, orden Agaricales, familia Agaricácea (Sánchez, 2010). Es el tercer hongo más grande producido comercialmente en el mundo, se encuentran creciendo de forma natural en material de madera debilitada o muerta.

Este hongo se ha venido cultivando en varias regiones de Europa y América, el principal motivo del aumento de su producción se atribuye a la gran adaptabilidad y versatilidad que tiene esta especie, tolerando incluso un amplio rango de temperatura, además, *P. ostreatus* tiene alta eficiencia de conversión de sustrato base en biomasa, con pocos requisitos de condiciones de crecimiento. También, este descomponedor primario es capaz de crecer adecuadamente en una amplia gama de subproductos agrícolas o agroindustriales, tales como aserrín, paja, pulpa de café, pasto, entre otros sustratos lignocelulósicos (Vieira *et al.*, 2019).

La composición química de *P. ostreatus* varía en dependencia del estado de desarrollo, la cepa y las condiciones de crecimiento (humedad, temperatura y nutrientes). Este hongo posee un alto contenido proteico y vitamínico (Tiamina (B₁), Riboflavina (B₂), Piridoxina (B₆) y Cobalamina (B₁₂)) (Varnero *et al.*, 2010). Produce enzimas específicas capaces de degradar lignina, fenoles y polifenoles hasta un 60% con respecto al contenido original. El espectro enzimático sintetizado está involucrado tanto en procesos

de biodegradación como en la producción de compuestos participantes en los procesos vitales del organismo fúngico, como son: la respiración celular, la construcción de biomasa y cuerpos fructíferos, la producción y descarga de las esporas (Salmones, 2017).

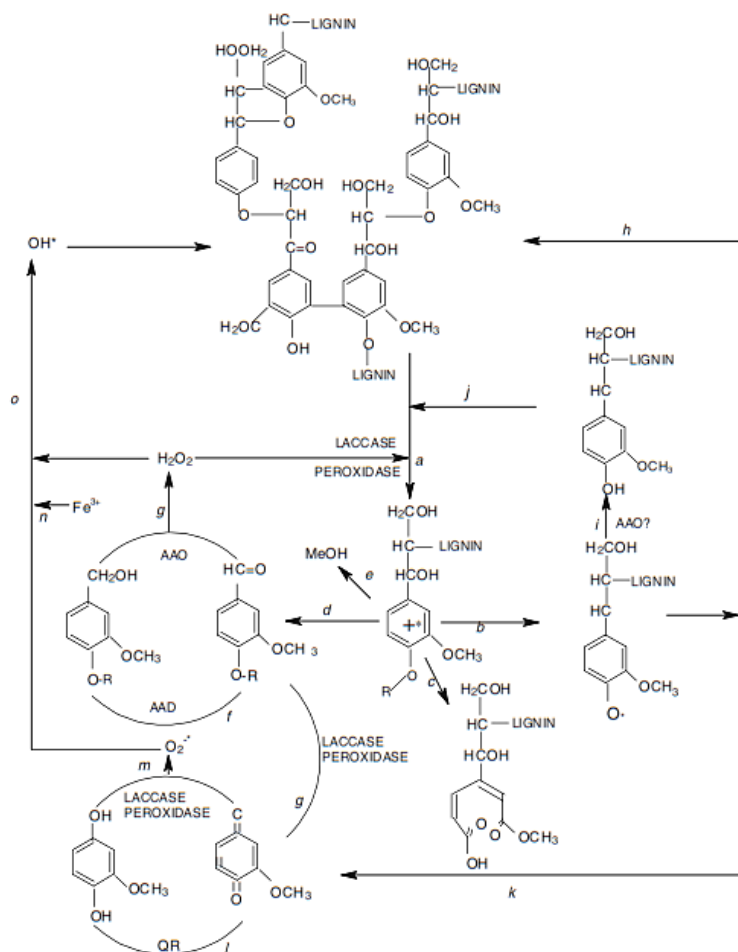
Podredumbre blanca

Pleurotus ostreatus pertenece a un grupo de hongos que tienen la capacidad de degradar exitosamente la lignina como se observa en la Figura 1, un componente principal de la lignocelulosa. Esta estructura se compone por tres polímeros que constituyen las paredes celulares vegetales: celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es el polisacárido mayoritario de los residuos vegetales, siendo responsable del soporte de las plantas ya que es el componente principal de las paredes. La hemicelulosa es un heteropolisacárido fácilmente hidrolizable, en contraste con la celulosa que es un compuesto más resistente. La lignina es un polímero complejo e hidrofóbico, amorfo y ópticamente inactivo. Conjuntamente con la hemicelulosa cimientan las fibras de celulosa para fortalecer las paredes celulares (Parenti *et al.*, 2013). El término podredumbre blanca deriva del aspecto que tiene la madera al ser atacada por estos hongos, donde la degradación de la lignina resulta en una apariencia blanquecina del sustrato.

Para el proceso de degradación de la lignocelulosa, *P. ostreatus* involucra a enzimas modificadoras de lignina. Las enzimas que intervienen en este proceso son: lignina peroxidasa (LiP, EC 1.11.1.14), lacasa (fenol oxidasas, Lac, EC 1.10.3.2), manganeso peroxidasa (MnP, EC 1.11.1.13) y peroxidasas versátiles (VP, EC 1.11.1.16); esta actividad es complementada por enzimas secundarias (Parenti *et al.*, 2013) (Reddy, 1995) (Pointing, 2001).

Figura 1.

Proceso de biodegradación de la lignina por hongos de pudrición blanca.



Nota: Degradación enzimática por hongos de pudrición blanca propuesta por C. Sánchez (2010).

Estiércol

El estiércol de origen animal corresponde a una mezcla de heces, orines, agua y material de cama, puede ser paja, aserrín, virutas o incluso restos de comida. El origen corresponde a ganadería bovina, caprina, ovina, etc., (Cajamarca, 2012). El estiércol porcino generalmente mantiene consistencia acuosa, mientras el estiércol bovino

sostiene una consistencia más sólida; la composición de estas sustancias se describe en la tabla 1.

Tabla 1.

Composición de estiércol porcino y bovino.

Estiércol	Materia orgánica (%)	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	Relación C/N
Porcino	45,3	76%	3,8	25
Bovino	48,9	30,6	1,7	18

Nota: Porcentaje de elementos esenciales en estiércol porcino y bovino, descrito por Durazno (2018).

Capítulo III: Materiales y métodos

Localización Geográfica

El presente proyecto se realizó en dos fases, una de campo para la elaboración del sistema de compostaje y pruebas de campo, y una de análisis de muestras del compost a nivel de laboratorio.

Fase de campo

La construcción del sistema de compostaje se llevó a cabo de forma artesanal, en el barrio Villa Flora, parroquia Pintag, Cantón Quito, Provincia de Pichincha, con ubicación geográfica -0.34224644160401785, -78.39434539565104.

Fase Laboratorio

El análisis de nutrientes de las muestras de compost se realizó en el laboratorio AGRARPROJEKT S.A., sector El Condado, Cantón Quito, Provincia de Pichincha, con ubicación -0.10630333883631492, -78.50958237637596.

Ensayo preliminar del sistema de compostaje

Este ensayo fue destinado a la evaluación inicial de los materiales y cantidades a utilizar, tomando como referencia los mejores modelos para el establecimiento del sistema tipo pila.

Previo a su montaje, se preparó el lugar donde fue instalado, evitando la caída de lluvia, la exposición directa al sol y el ingreso de animales o algún agente externo. Los parámetros a evaluar en este sistema fueron: temperatura, pH y humedad; cuyo control se realizó en períodos de tres días.

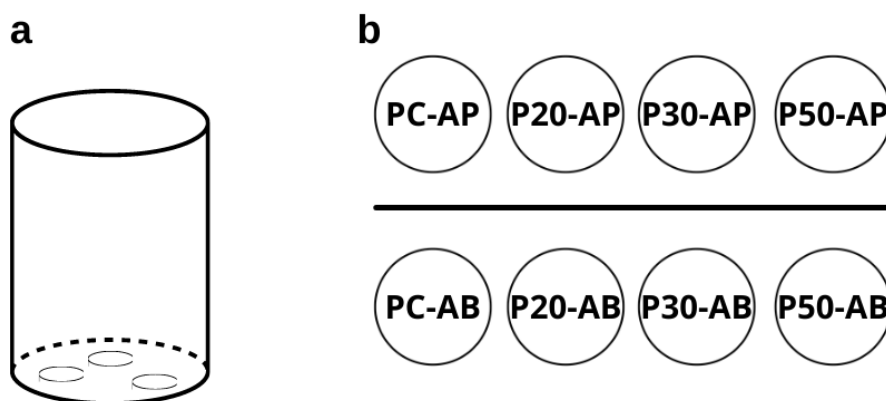
Compostera tipo Balde

Para la elaboración de este sistema de compostaje se usaron 8 baldes de aproximadamente 20L y se realizaron agujeros en la base para permitir el drenaje de lixiviados (Figura 2a). Para este diseño se consideraron dos ensayos, uno con estiércol porcino (P-AP) y otro con estiércol bovino (P-AB); cada uno de los cuales contó con tres

tratamientos y un control (Figura 2b). Los tratamientos se describen de acuerdo al porcentaje en peso del sustrato gastado de hongo ostra (SGH) que se utilizó en cada unidad de compostaje, siendo PC: tratamiento control, P20: tratamiento al 20%, P30: tratamiento al 30% y P50: tratamiento al 50%.

Figura 2.

Diseño de sistema de compostaje preliminar. a) Estructura cilíndrica para compostera tipo balde. b) Esquema de distribución de las unidades a compostar, la fila superior corresponde a los tratamientos con abono porcino (P-AP) y la inferior a los tratamientos con abono bovino (P-AB).



Material orgánico

El residuo de hongo ostra fue obtenido de una producción artesanal ubicada en la misma localización de la fase de campo, al igual que los tipos de estiércol a utilizar. Los materiales para la formulación del sistema fueron pesados siguiendo su relación de carbono/nitrógeno (C/N). De acuerdo con Richard & Trautmann (1996), el cociente C/N inicial recomendado es de 30/1, el cual fue tomado como base para el dimensionamiento y las cantidades a utilizar. En la siguiente tabla se presentan valores estándar de C/N para la mezcla del proceso.

Tabla 2.

Material orgánico para la mezcla inicial del compostaje preliminar.

Material	Relación C/N
Sustrato gastado de hongo ostra (<i>Pleurotus ostreatus</i>) (SGH)	34,62/1
Estiércol bovino	18/1
Estiércol porcino	25/1
Aserrín	368
Poda (césped)	44/1

Nota: Relación C/N para SGH recuperado de Wu *et al.* (2020) y Gao *et al.* (2010).

Los materiales a compostar se colocaron por capas, de tal forma que la degradación sea homogénea. La disposición de cada elemento está conforme a la Figura 3. El dimensionamiento del sistema preliminar para los ensayos con estiércol porcino y bovino se describe en la Tabla 3.

Figura 3.

Distribución de materiales a compostar dentro del reactor tipo balde. SGH: Sustrato gastado de hongo ostra.

Aserrín
SGH
Estiércol
Poda
Estiércol
SGH
Aserrín

Tabla 3.

Materiales utilizados para las mezclas de los tratamientos con estiércol bovino y porcino.

Material	Tratamiento			
	PC-AB/ PC-AP	P20-AB/ P20-AP	P30-AB/ P30-AP	P40-AB/ P40-AP
Aserrín	3	3	3	3
Poda	1	1	1	1
Estiércol Bovino/Porcino	2	2	2	2
SGH	-	1,2	2	3
Total (Kg)	6	7,2	8	9

Las cantidades a utilizar para cada residuo orgánico se calcularon de acuerdo a la siguiente fórmula, basada en la concentración de carbono, nitrógeno y humedad de los materiales.

$$Q_2 = \frac{Q_1 * N_1 * \left(R - \frac{C_1}{N_1} \right) * (100 - M_1)}{N_2 * \left(\frac{C_2}{N_2} - R \right) * (100 - M_2)}$$

Donde:

R = cociente C/N de la mezcla para compostaje.

Q_n = Masa del material n (peso fresco).

C_n = Porcentaje de carbono (%) del material n.

N_n = Porcentaje de nitrógeno (%) del material n.

M_n = contenido de humedad (%) del material n.

Establecimiento del sistema de compostaje tipo pila

Para este diseño se consideraron dos ensayos, uno con estiércol porcino (T-AP) y otro con estiércol bovino (T-AB), para lo cual se adecuó previamente el lugar de instalación, evitando el efecto de cualquier factor externo. Los parámetros evaluados en este sistema corresponden a: temperatura, pH, humedad, olor y color; medidos en

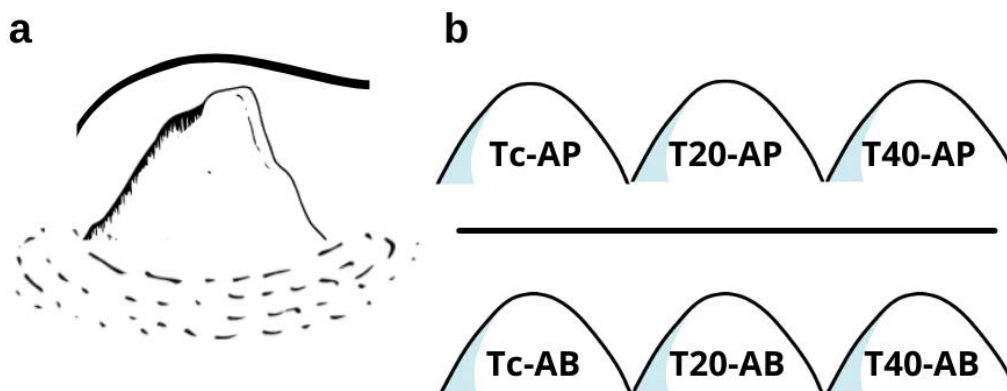
períodos de siete días. Además del análisis de fitotoxicidad y elementos una vez culminado el proceso de compostaje.

Compostera tipo pila

Para la implementación de este sistema se utilizó un área aproximada de 10m². Cada pila tuvo una altura aproximada de 35cm y 30 cm de radio, la distancia entre las unidades fue de 20 cm y se cubrió con plástico para evitar el efecto de factores externos (Figura 4a). La distribución de las unidades a compostar de acuerdo a los ensayos planteados se observan en la Figura 4b; cada ensayo tuvo dos tratamientos y un control. Los tratamientos utilizados variaron en dependencia del porcentaje en peso SGH añadido a las mezclas, TC: tratamiento control, T20: tratamiento al 20%, y T40: tratamiento al 40%.

Figura 4.

Distribución de las unidades de compostaje en pila.



Residuos orgánicos

Para la formulación de los ensayos se utilizaron los residuos orgánicos descritos en la Tabla 4, siguiendo la misma metodología del diseño preliminar, basada en la relación C/N.

Tabla 4.

Material orgánico a usar en las mezclas y su relación C/N.

Material	Relación C/N
Sustrato gastado de hongo ostra (<i>Pleurotus ostreatus</i>) (SGH)	34,62/1
Estiércol bovino	18/1
Estiércol porcino	25/1
Paja	150/1
Poda (césped)	44/1

La disposición de los materiales dentro del reactor tipo pila está conforme a lo descrito en la Figura 5. Las cantidades de material orgánico utilizado para la conformación de cada pila se describen en la Tabla 5, calculados para un valor teórico inicial de la relación C/N de 30/1. Este diseño se planteó en base a las dimensiones de los mejores tratamientos observados durante el tratamiento preliminar.

Figura 5.

Distribución de materiales a compostar dentro del reactor en pila.



Tabla 5.

Material orgánico para los tratamientos suplementados con estiércol bovino y porcino.

Material	Tratamiento		
	TC-AB/ TC-AP	T20-AB/ T20-AP	T40-AB/ T40-AP
Paja	2	2	2
Restos de poda	1	1	1
Estiércol	4	4	4
Bovino/Porcino			
Desecho de hongo ostra	-	1,5	3
Total (Kg)	7	8,5	10

Control de Aireación

El control de aireación se realizó mediante el volteo manual y continuo del material orgánico, de tal forma que la porosidad del sistema se mantenga lo más homogénea posible para mantener un ambiente aerobio, ya que esta variable está relacionada directamente con la temperatura y humedad (Haug, 1993). En la siguiente tabla se muestran los valores óptimos de aireación evaluados.

Tabla 6.

Valores referenciales para la aireación para sistemas de compostaje (Román et al., 2013).

Condición	%	Problemas	Solución
Baja	< 5	Insuficiente evaporación o exceso de humedad Ambiente de anaerobiosis	Volteo de mezcla Adicción de material

Óptima	5-15%		
Excesiva	> 15	Baja temperatura o evaporación excesiva de agua	Picado del material para reducir la porosidad
			Incorporación de agua o material fresco

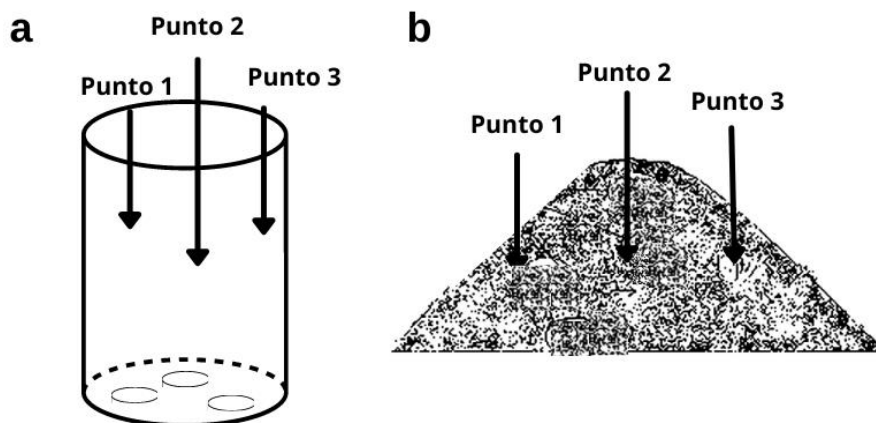
Nota: Valores de aireación, posibles problemas y soluciones, propuestos por Román *et al.*, (2013).

Control de Humedad

Una vez cargadas las unidades de compostaje, tanto del ensayo preliminar como del final, se midió el porcentaje de humedad de la mezcla a través un medidor de humedad ATENEA. Cada medición fue tomada en tres secciones tanto del balde como de la pila, para tener un promedio adecuado de toda la estructura del sistema (Figura 6).

Figura 6.

Puntos de control de temperatura, pH y humedad dentro de unidades. a) Sistema tipo balde. b) Sistema en pila.



La humedad óptima para el compost se encuentra alrededor del 55%, aunque varía dependiendo del sistema empleado para realizar el compostaje. Si la humedad se

encuentra fuera del rango óptimo para el desarrollo de microorganismo, el proceso de compostaje se vería afectado. Para mantener la humedad adecuada se consideraron los siguientes aspectos:

Tabla 7.

Parámetros de humedad óptimos.

Porcentaje de humedad	Problemas	Soluciones
<45%	Humedad insuficiente Puede detener el proceso de compostaje por falta de agua para los microorganismos	Se debe adicionar agua al material o añadir material fresco con mayor cantidad de agua (restos de fruta)
45%-60%	Rango óptimo	
>60%	Oxígeno insuficiente Material muy húmedo, el oxígeno queda desplazado. Puede dar lugar a zonas de anaerobiosis	Volteo de la mezcla y/o adición de material de bajo contenido de humedad y alto valor en carbono (aserrín)

Nota: Valores de humedad, posibles problemas y soluciones, propuestos por Román *et al.*, (2013).

Control de pH

Para el control de esta variable se utilizó un medidor de pH de suelos ATENEA SOIL SURVEY INSTRUMENT, en los puntos descritos en la Figura 6. Para que exista una adecuada descomposición los valores deberán encontrarse entre 4,5 a 8,5. Si la medición cae debajo de 4,5 unidades, existirá un medio acidificado por ácidos orgánicos, por lo que es recomendable agregar materiales ricos en nitrógeno, por otra parte, si la medición es mayor a 8,5, la presencia de amoníaco provoca la alcalinización del sistema,

para lo cual se recomienda incorporar materiales secos y de alto contenido de carbono.

Control de Temperatura

Los valores de temperatura se tomaron en los mismos períodos de control del pH y humedad, utilizando el equipo ATENEA SOIL SURVEY INSTRUMENT. Los rangos para la temperatura óptima de desarrollo del proceso se describen en la siguiente tabla:

Tabla 8.

Fases del proceso de compostaje en función de su temperatura y duración.

Fase	Temperatura	Tiempo
Latencia	Ambiente	24 a 72 horas
Mesófila	< 45°C	2 a 8 días
Termófila o de Higienización	> 45°C	8 a 60 días
Enfriamiento o Mesófila II	40-45 °C	21 a 30 días
Maduración	Ambiente	> 30 días

Análisis organoléptico

La medición tanto de olor y color del sistema se realizaron de acuerdo con la metodología de Escobar (2012), en los períodos correspondientes de control.

Olor (tipo e intensidad)

Se utilizó una vara de madera limpia, la cual se introdujo de forma perpendicular dentro de la pila, luego de tres minutos aproximadamente, se retiró y evaluó el olor de acuerdo a la siguiente escala:

Tabla 9.

Escala de olor para el proceso de compostaje.

Olor	Valoración
Amoniacal fuerte	1
Amoniacal ligero	2
Neutro	3

Cabe mencionar que la intensidad del olor está relacionada inversamente con el porcentaje de degradación del proceso: a mayor biodegradación, menor intensidad.

Color

Se tomaron muestras de diferentes secciones y profundidades del sistema. El color se evaluó de acuerdo a la siguiente escala (Tabla 10), a medida que el compost va madurando el color de la mezcla tiende a oscurecer.

Tabla 10.

Escala de color para el proceso de compostaje.

Color	Valoración
Original	1
Marrón claro	2
Marrón oscuro	3

Análisis de Laboratorio

Este procedimiento se realizó para el compost producido en el reactor tipo pila, una vez concluido el proceso y realizados los ajustes correspondientes respecto al ensayo preliminar.

Muestreo

Se obtuvo una muestra compuesta de 1 kg a partir de tres muestras simples recolectadas de cada punto de control y posteriormente homogenizadas. En total se obtuvieron tres muestras de los tratamientos con estiércol porcino y tres con estiércol bovino.

Cálculo de materia orgánica

Para la medición de la materia orgánica y carbono contenidos en las unidades de compostaje se utilizó la metodología AOAC 967.05/DIN 19684-3, de la Asociación de Químicos Agrícolas Oficiales (siglas en inglés, AOAC).

Cálculo de Nitrógeno Total Kjeldahl

Para la medición del nitrógeno total se utilizó la metodología AOAC 978.04, Nitrogen (Total) Kj.

Análisis de fitotoxicidad

Para este ensayo se evaluó el índice de germinación de semillas de Lechuga Grandes lagos (*Lactuca sativa*). Se prepararon 2 repeticiones de cada unidad operacional a una proporción 1:1 (tierra cultivable: compost maduro) y un control. En cada repetición se colocaron cinco semillas. Este proceso tuvo una duración de 15 días hasta su medición. Para calcular el índice de germinación (IG) se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$PGR = \frac{\text{N}^\circ \text{ de semillas germinadas en el tratamiento}}{\text{N}^\circ \text{ de semillas germinadas en el control}} * 100$$

$$CRR = \frac{\text{Elongación de radícula en el tratamiento}}{\text{Elongación de radícula en el control}} * 100$$

$$IG = \frac{PGR * CRR}{100}$$

Donde;

PGR = Porcentaje de germinación de semillas

CRR = Crecimiento radicular relativo

IG = Índice de germinación

Análisis estadístico

Las variables de respuesta correspondientes a temperatura, humedad, pH, olor, color e IG, fueron analizadas con los software GraphPad Prism 8.0.1 y R-4.1.0. Para verificar la normalidad de los datos obtenidos se realizó la prueba de Shapiro-Wilks. Se realizaron las pruebas paramétricas: análisis de varianza (ANOVA) de una vía y la prueba LSD (Least significant difference) de Fisher, mientras que las pruebas no paramétricas empleadas fueron las de Kruskal-Wallis y Wilcoxon.

Diseño experimental

Se planteó un diseño experimental en bloques completamente aleatorizados, estableciendo dos bloques correspondientes al uso de estiércol bovino y porcino. Para el factor de variación se consideró el porcentaje en peso usado de residuo de hongo ostra, mientras que las variables de respuesta fueron los parámetros de control: temperatura, pH, humedad, olor, color e IG. Todos los ensayos se realizaron a un nivel de significancia $p < 0,05$.

Compostaje tipo balde

Temperatura, pH y humedad. Se evaluaron tres niveles del factor y un control en cada bloque, con un total de seis unidades operacionales y dos controles. Para cada tratamiento se tomaron tres repeticiones en cada punto de control del sistema, con el objetivo de mantener robustez en los datos. El diseño se describe de la siguiente manera:

Tabla 11.

Diseño experimental para datos de temperatura, pH y humedad.

Bloques (Tipo de estiércol)			
Tratamiento	Factor (SGH) % (p/p)	Bovino (P-AB)	Porcino (P-AP)
<i>PC (Control)</i>	0%	B _{C1} , B _{C2} , B _{C3}	P _{C1} , P _{C2} , P _{C3}

<i>P20</i>	20%	B ₁ , B ₂ , B ₃	P ₁ , P ₂ , P ₃
<i>P30</i>	30%	B ₄ , B ₅ , B ₆	P ₄ , P ₅ , P ₆
<i>P50</i>	50%	B ₇ , B ₈ , B ₉	P ₇ , P ₈ , P ₉

Donde;

B_i= Medición del sistema de compostaje con estiércol bovino

P_i= Medición del sistema de compostaje con estiércol porcino

Compostaje tipo pila

Temperatura, pH, humedad, olor y color. Se evaluaron dos niveles del factor y un control por cada bloque, para un total de cuatro unidades operacionales y dos controles. Para cada unidad se tomaron tres repeticiones en cada punto de control del sistema. El diseño se describe en la Tabla 12:

Tabla 12.

Diseño experimental para datos de temperatura, pH, humedad, olor y color.

Bloques (Tipo de estiércol)			
Tratamiento	Factor (SGH) % (p/p)	Bovino (T-AB)	Porcino (T-AP)
<i>TC (Control)</i>	0%	B _{C1} , B _{C2} , B _{C3}	P _{C1} , P _{C2} , P _{C3}
<i>T20</i>	20%	B ₁ , B ₂ , B ₃	P ₁ , P ₂ , P ₃
<i>T40</i>	40%	B ₄ , B ₅ , B ₆	P ₄ , P ₅ , P ₆

Donde;

B_i= Medición del sistema de compostaje con estiércol bovino

P_i= Medición del sistema de compostaje con estiércol porcino

Fitotoxicidad: Índice de germinación (IG). Para este diseño se evaluaron dos niveles de factor y un control por cada bloque. Para cada medición se tuvieron dos repeticiones, con un total de doce unidades experimentales. El diseño se describe de la siguiente manera:

Tabla 13.

Diseño experimental para datos de IG.

Bloques (Tipo de estiércol)			
Tratamiento	Repetición	Bovino	Porcino
Control	R _{C1}	S _{C1} , S _{C2} , S _{C3} , S _{C4} , S _{C5}	C _{C1} , C _{C2} , C _{C3} , C _{C4} , C _{C5}
	R _{C2}	S _{C6} , S _{C7} , S _{C8} , S _{C9} , S _{C10}	C _{C6} , C _{C7} , C _{C8} , C _{C9} , C _{C10}
F₁	R ₁	S ₁ , S ₂ , S ₃ , S ₄ , S ₅	C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅
	R ₂	S ₆ , S ₇ , S ₈ , S ₉ , S ₁₀	C ₆ , C ₇ , C ₈ , C ₉ , S ₁₀
F₂	R ₄	S ₁₆ , S ₁₇ , S ₁₈ , S ₁₉ , S ₂₀	C ₁₆ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ , C ₂₀
	R ₅	S ₂₁ , S ₂₂ , S ₂₃ , S ₂₄ , S ₂₅	C ₂₁ , C ₂₂ , C ₂₃ , C ₂₄ , C ₂₅

Donde;

F_i= Unidad experimental de T_i

R_i= Repetición por unidad experimental

S_i= Semilla cultivada con compost T_i-AB

C_i= Semilla cultivada con compost T_i-AP

Capítulo IV: Resultados

Diseño de sistema de compostaje tipo balde

A partir del análisis bibliográfico partimos de una relación C/N de 30 para la mezcla inicial, tomando aserrín como material de soporte, estiércol como fuente de microorganismo y nitrógeno y, los restos de poda como fuente de carbono. Las mezclas finales del sistema fueron colocadas en filas dependiendo del tratamiento empleado (Figura 7).

Figura 7.

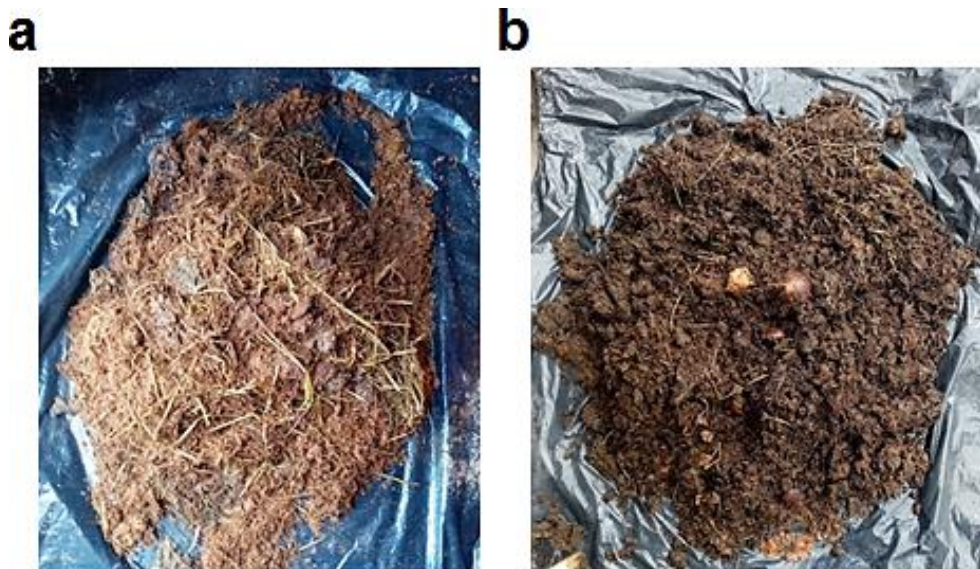
Distribución del sistema de compostaje preliminar tipo balde.



Este proceso permaneció activo durante 10 semanas aproximadamente, a partir de las cuales se observó la degradación progresiva del material a compostar, conjuntamente con el desecho de hongo ostra, como se puede evidenciar en la Figura 8, pasando de una mezcla completamente heterogénea hasta observar una mezcla homogénea de color marrón oscuro. Este resultado se observó en todos los tratamientos P-AB y P-AP.

Figura 8.

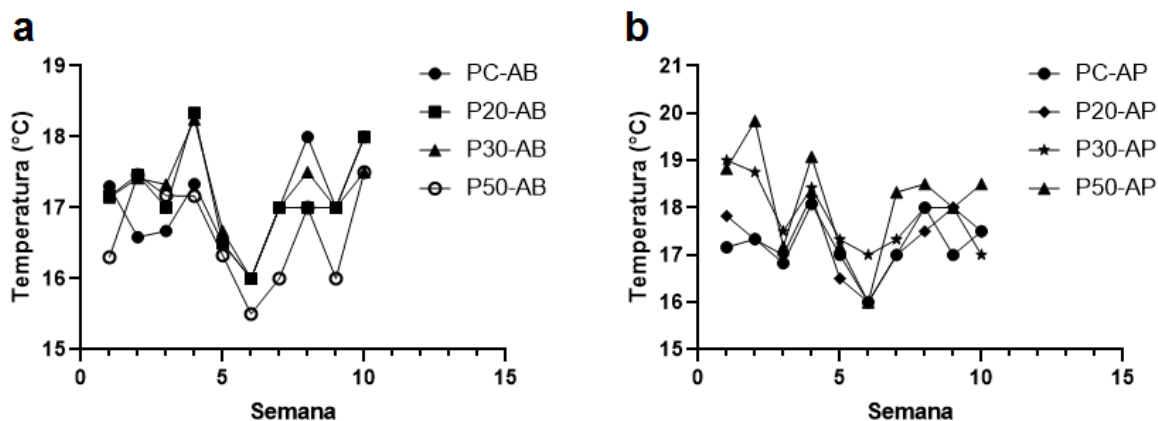
Degradación de material orgánico en 10 semanas del tratamiento P50-AP. a) Material a compostar al día 3. b) Compost degradado al final del proceso.



La temperatura de los tratamientos presentó un comportamiento atípico ya que no existieron marcados cambios como se describe teóricamente, es decir, a pesar del evidente proceso de degradación y actividad microbiana, no hubo desprendimiento notorio de calor correspondiente a la fase termófila. En los tratamientos con abono bovino la temperatura aumentó hasta un máximo de 18,5 °C en los tratamientos P20-AB y P30-AB en las primeras cuatro semanas, en contraste, P50-AB mantuvo rangos debajo de la media. Mientras que en los tratamientos con abono porcino, quien presentó mayor actividad fue la unidad P50-AP con valor máximo de 20°C. A partir de la quinta semana la temperatura descendió y se mantuvo en el rango de 16-18°C para todas las unidades en el tiempo restante del ensayo (Figura 9).

Figura 9.

Cambio de temperatura respecto al tiempo. a) Variación de temperatura del bloque tratado con abono bovino. b) Variación de temperatura del bloque tratado con abono porcino.

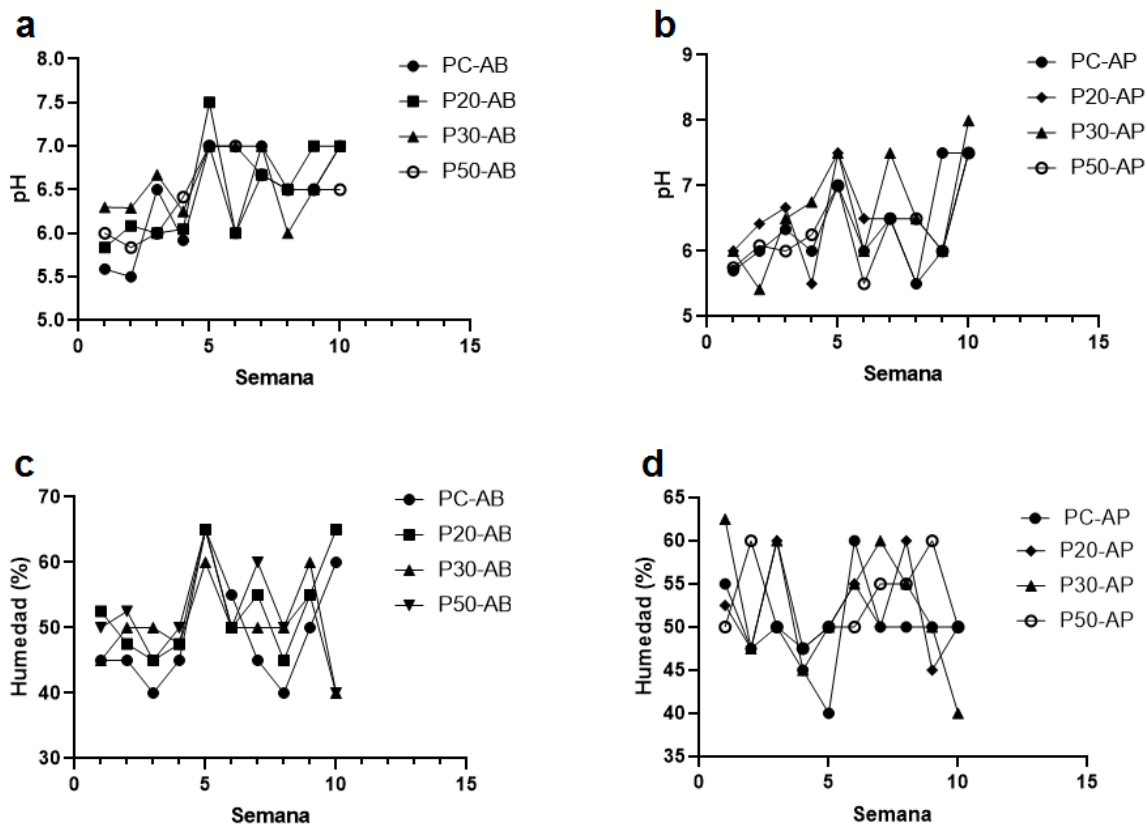


El pH de todos los tratamientos descendió hasta un pico inferior promedio de 5,5 en las primeras cuatro semanas, dando a entender la formación de ácidos orgánicos y el inicio de la degradación. En las semanas siguientes y hasta finalizar el proceso, en los tratamientos P-AB el pH se estabilizó en un rango neutro de 6,5-8,0 (Figura 10a). Para las unidades P-AP, a partir de la quinta semana se observaron dos picos inferiores de 5,5 en los tratamientos P50-AP y PC-AP, mientras que para las unidades restantes se mantuvo un pH aproximadamente neutro (6,0 a 8,0) (Figura 10b).

El contenido de humedad fue el parámetro mejor controlado ya que se logró mantener un rango óptimo entre 40% a 65% para todas las unidades de compostaje (Figura 10c, 10d), de acuerdo a lo descrito bibliográficamente.

Figura 10.

a) Variación de pH en el bloque P-AB, b) Variación de pH en el bloque P-AP, c) Variación del porcentaje de humedad en P-AB y d) Variación de humedad en P-AP.

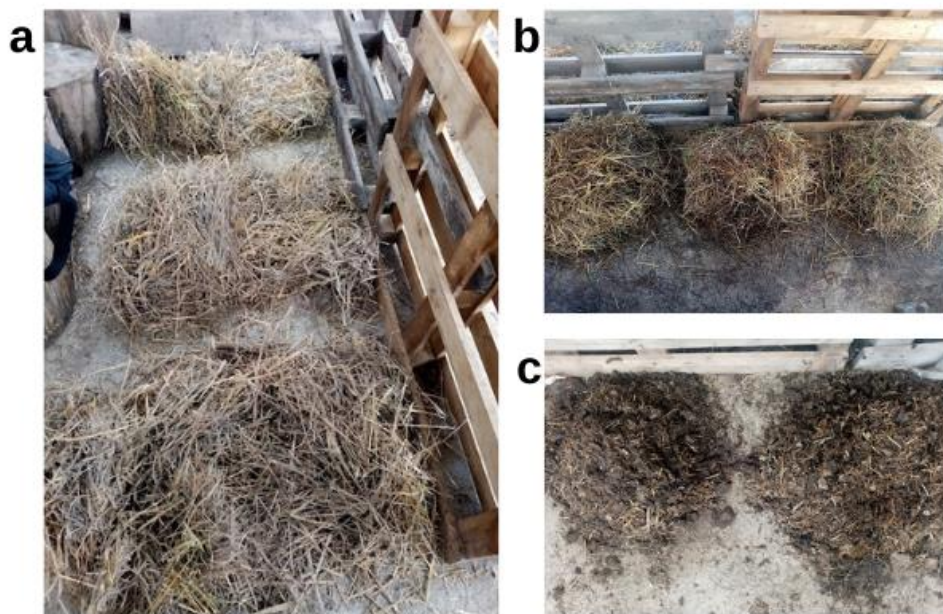


Diseño de sistema de compostaje tipo pila

El compostaje en pilas duró aproximadamente doce semanas, en las cuales se pudo observar la degradación progresiva de los materiales utilizados. Durante la primera semana no se observan cambios y las mezclas siguen siendo completamente heterogéneas (Figura 11a). A partir de la quinta semana se empezaron a evidenciar los cambios en la estructura de los componentes, presenciando el proceso degradativo en todos los tratamientos (Figura 11b). En la semana doce la diferencia fue más notoria respecto a la primera semana, los materiales se incorporaron hasta una textura casi homogénea (Figura 11c).

Figura 11.

Proceso de descomposición de materia orgánica de los tratamientos T-AP. a) Material a compostar al primer día. b) Material degradado a las 6 semanas. c) Material resultante de degradación a las 12 semanas.

**Temperatura**

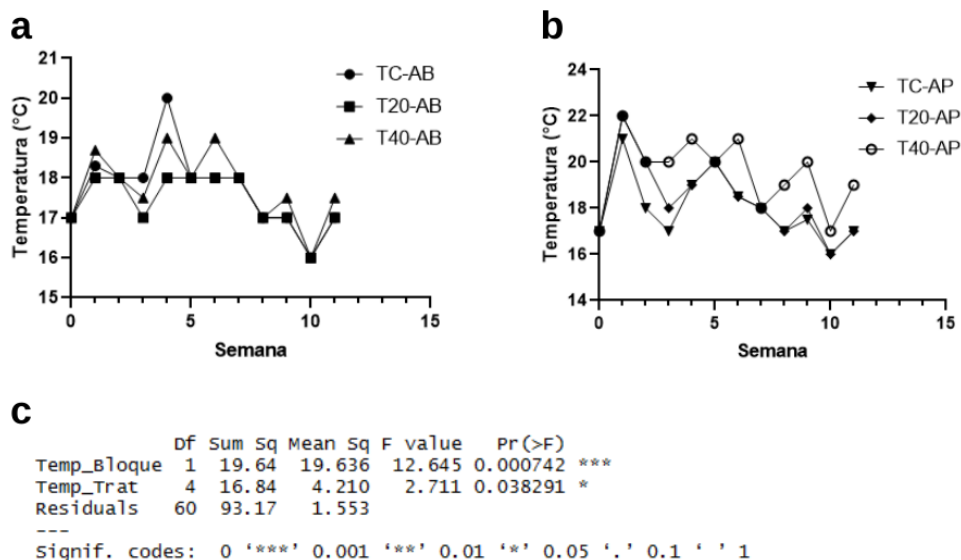
Durante el experimento no se observó un incremento sustancial de temperatura en ambos ensayos, es decir, no se exhibió la fase termófila. De manera general, todas las unidades de compostaje tuvieron un comportamiento similar, con un leve aumento de temperatura en las primeras cinco semanas y posterior decremento hasta finalizar el proceso. En los tratamientos T-AB (Figura 12a) se observó el pico más alto en el control (TC-AB) a la cuarta semana; el tratamiento T20-AB presentó un rango bajo de temperatura de 16-18°C; mientras que el T40-AB tuvo el mejor comportamiento, manteniendo por varias semanas algunos de los valores más altos registrados. En los tratamientos T-AP se observó que los valores máximos se dieron durante las dos primeras semanas, un promedio de 22°C para los tres tratamientos (Figura 12b). T40-AP

fue el más activo ya que se mantuvo con incrementos de temperatura periódicos, por otra parte, TC-AP y T20-AP sufrieron los decrementos más significativos de este ensayo.

Del análisis de varianza (ANOVA) ($p < 0,05$), se identificó que tanto el tratamiento empleado como el bloque (T-AB o T-AP) influyen en el comportamiento de la temperatura, siendo el tipo de estiércol empleado para las mezclas el parámetro más significativo (Figura 12c). Además, el análisis de comparación de medias de bloques y tratamientos a través de la prueba LSD, dio a conocer que la temperatura actúa estadísticamente diferente en los bloques. Por su parte, los tratamientos TC-AB, T20-AB, T40-AB, TC-AP y T20-AP, mantienen un comportamiento similar, en contraste al tratamiento T40-AP, que es significativamente diferente.

Figura 12.

a) Variación de temperatura de los tratamientos AB, b) Variación de temperatura de los tratamientos AP y c) Prueba ANOVA del efecto del bloque y el tratamiento sobre la temperatura.



pH

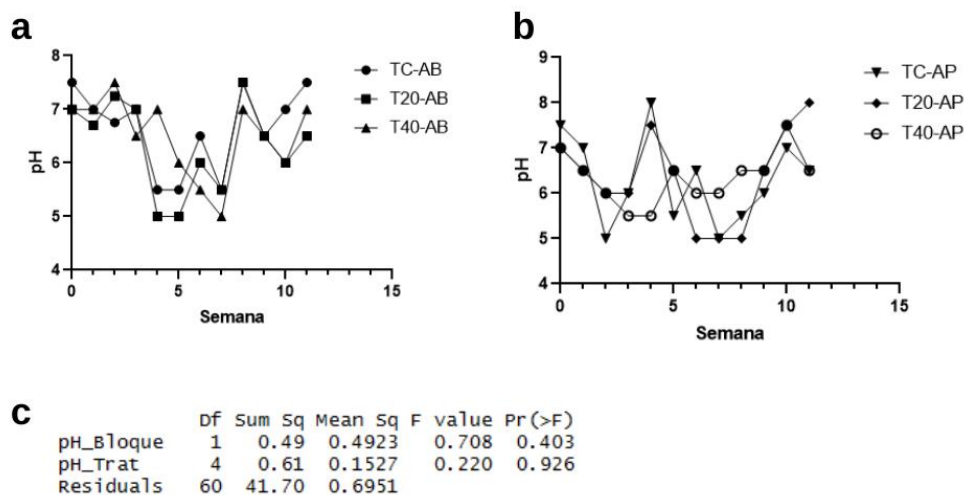
En las unidades tratadas con estiércol bovino, este parámetro descendió hasta 5,0, infiriendo la formación de ácidos orgánicos en el intervalo de la semana cuatro a la

siete en todos los tratamientos (Figura 13a) y, estabilizándose en un pH neutro en el tiempo restante. Por otra parte, en los ensayos con estiércol porcino T20-AP y T40-AP presentaron dos decrementos, entre las semanas 3-5 y 5-8, mientras que el control TC-AP mantuvo un perfil de pH bajo en el rango de 5,5 a 6,5. Todas las unidades T-AP mantuvieron un valor neutro a partir de la semana nueve hasta finalizar el experimento (Figura 13b).

El análisis estadístico, a un nivel de significancia de 0,05, indica que no hay una diferencia significativa en las unidades, independientemente al tipo de abono usado o el tratamiento con residuos de hongo ostra empleado (Figura 13c). La prueba LSD corroboró que el comportamiento entre bloques y tratamientos, es estadísticamente similar.

Figura 13.

Variación del pH para los tratamientos AB (a) y AP (b). c) Prueba ANOVA del efecto del tratamiento y bloque aplicados a las unidades a compostar.



Humedad

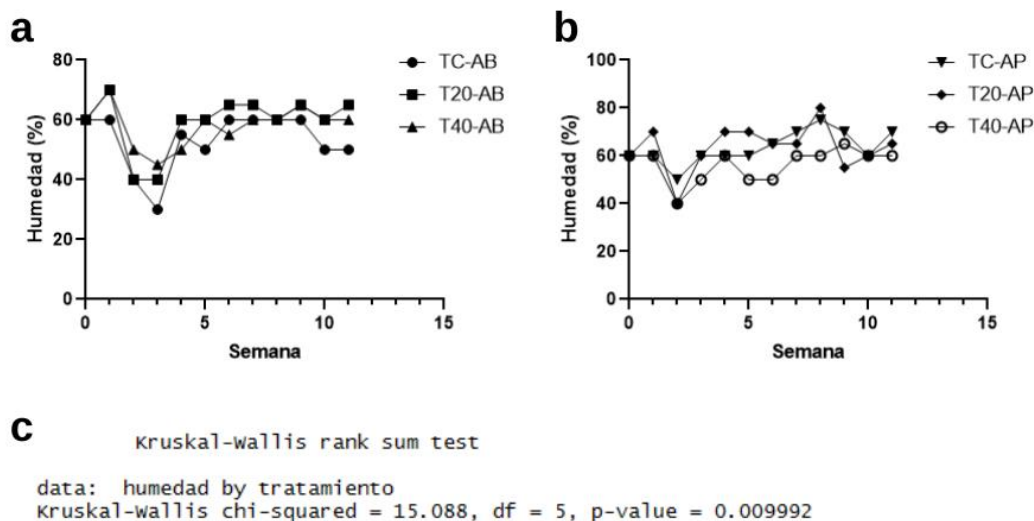
El aumento o disminución del porcentaje agua en el bloque T-AB se mantuvo controlado en un intervalo de 40-60%, a pesar de presentar algunos valores atípicos durante las tres primeras semanas en los dos tratamientos y el control (Figura 14a). La

humedad para las unidades TC-AP y T20-AP se mantuvo sobre el valor límite de 60% durante la mayor parte del experimento, mientras que T40-AP tuvo un comportamiento óptimo en un rango mencionado (Figura 14b).

La comparación de los tratamientos (prueba de Kruskal-Wallis, $p < 0,05$) dio a conocer que al menos uno de los tratamientos es estadísticamente diferente debido al porcentaje de humedad contenido (Figura 14c). Además, se realizó una comparación entre pares de los tratamientos y su control (prueba de Wilcoxon), dando como resultado las diferencias marcadas entre TC-AP con T40-AP y TC-AB con T20-AB, por otra parte, las unidades restantes no presentaron diferencia significativa respecto a su control.

Figura 14.

Variación de la humedad de las unidades de compostaje de los tratamientos T-AB (a) y T-AP (b). c) Prueba Kruskal-Wallis para la comparación muestral de las unidades a compostar.



Olor

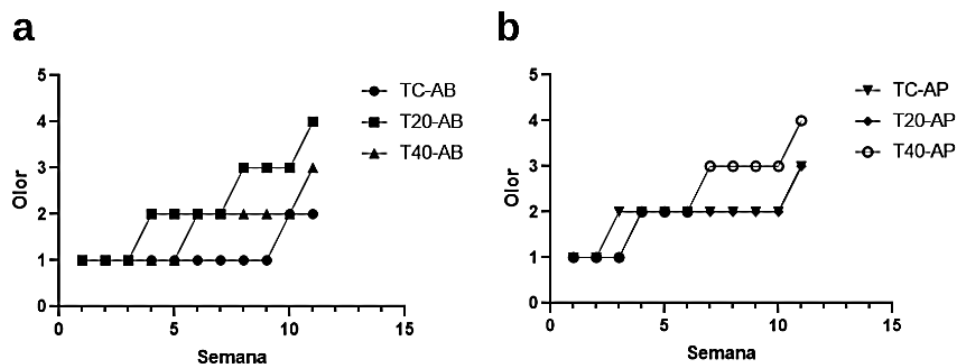
En general, todas las unidades presentaron degradación durante el proceso, generando un cambio sustancial en el olor producido. Inicialmente se percibieron especies nitrogenadas pertenecientes al estiércol utilizado, sin embargo, con el paso del

tiempo la intensidad disminuyó gradualmente, hasta percibir un olor neutro semejante a tierra húmeda.

En la Figura 15a se puede observar que para los tratamientos T-AB, el que presenta mayor cambio es el T20-AB, seguido del T40-AB y TC-AB, siendo de este último las mediciones más bajas. En los tratamientos T-AP, T40-AP presentó mejor condiciones en comparación con T20-AP y TC-AP, cuyos valores fueron inferiores (Figura 15b). De la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) se obtuvo que al menos una de las unidades genera un olor diferente en su proceso de compostaje, dependiendo del tratamiento empleado (Figura 15c). La prueba de pares de Wilcoxon muestra que existen diferencias entre los tratamientos T20-AB y T40-AB, con su respectivo control; mientras que los tratamientos T-AP presentan el mismo comportamiento que el control.

Figura 15.

Variación de olor respecto al tiempo en los tratamientos con T-AB (a) y T-AP (b). c) Prueba Kruskal-Wallis para la comparación muestral de las unidades a compostar.



C

kruskal-wallis rank sum test
 data: olor by tratamiento
 kruskal-wallis chi-squared = 13.58, df = 5, p-value = 0.01851

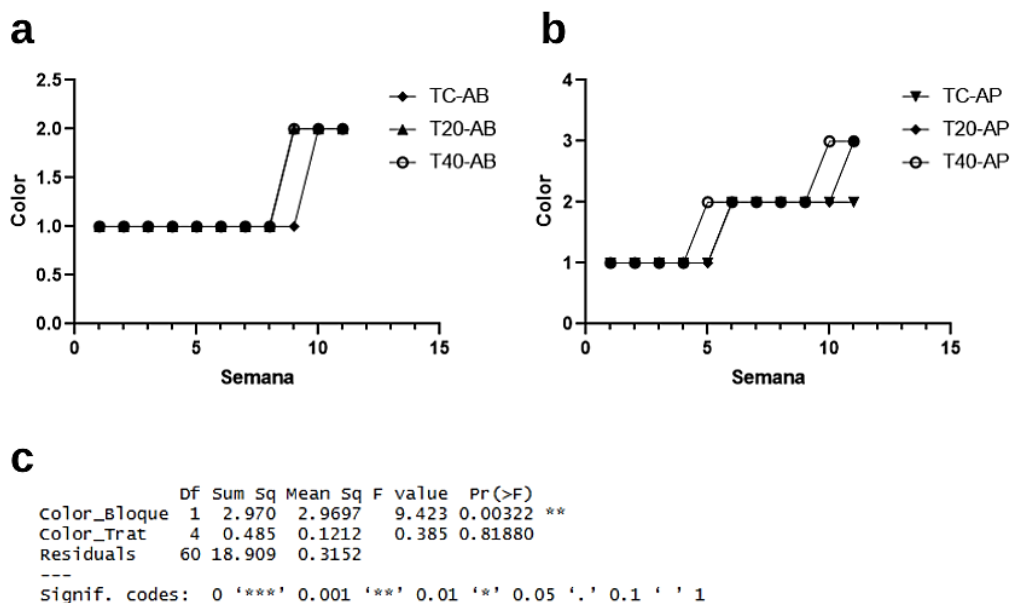
Color

Al igual que con el olor, esta característica organoléptica tuvo un cambio sustancial durante todo el proceso, inicialmente desde un color marrón claro hasta finalizar en un tono más oscuro producto de los residuos degradados y homogenizados (Figura 11).

Los tratamientos T-AB mantuvieron la misma tendencia de cambio, para todas las unidades se registra un valor de 2, de acuerdo con la escala de medición (Figura 16a). Por otra parte, las unidades T20-AP y T40-AP presentaron el mejor resultado, mientras que el control se mantuvo similar a las unidades T-AP (Figura 16b). Del análisis estadístico se identificó que los bloques T-AB y T-AP tienen influencia estadística significativa para este parámetro, sin embargo, los tratamientos dentro de cada bloque no presentan diferencias notables (Figura 16c). El efecto de los bloques fue corroborado a través de la prueba LSD.

Figura 16.

Variación del color de las unidades a compostar con estiércol bovino (a) y porcino (b). c) Prueba ANOVA para la influencia del bloque y tratamiento en las unidades a compostar.



Análisis de Fitotoxicidad

Al cabo de 15 días de cultivo, todos los tratamientos presentaron germinación y crecimiento radicular. Las plántulas ya formadas se separaron del suelo de cultivo y se midió el crecimiento radicular (Figura 17).

Figura 17.

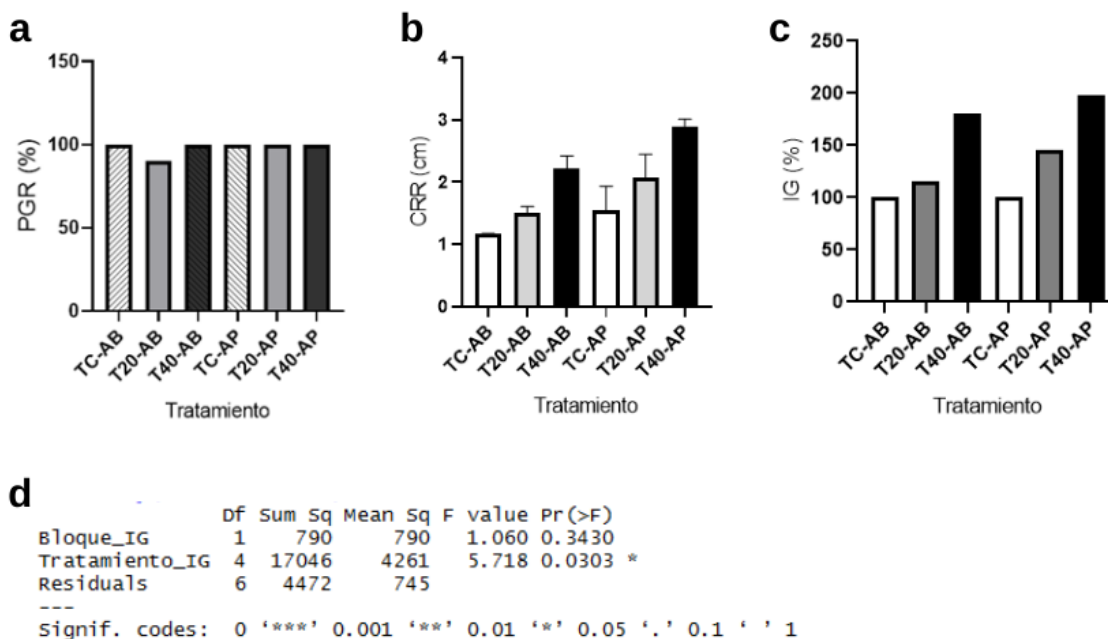
Germinación y crecimiento radicular para semillas de lechuga cultivadas en T40-AP.



El porcentaje de germinación (PGR) mostró un 100% de efectividad en los tratamientos TC-AB, T40AB, TC-AP, T20-AP y T40-AP, mientras que para T20-AB se obtuvo un porcentaje del 90% como se observa en la Figura 18a. Por su parte, el crecimiento radicular relativo (CRR) produjo mayores valores en los tratamientos T40-AB y T40-AP, para sus respectivos bloque (Figura 18b); aunque de manera general, el bloque AP ha provisto los mejores resultados. Esto es corroborado con el índice de germinación (IG), que presentó mejor comportamiento en los tratamientos T-AP, principalmente en T40-AP (Figura 18c). El análisis estadístico determinó que el tratamiento tienen un efecto estadísticamente significativo en el índice de germinación, mientras que el bloque no tienen influencia en el IG (Figura 18d).

Figura 18.

a) Porcentaje de germinación (PGR), b) Crecimiento radicular relativo (CRR), c) Índice de germinación (IG) y d) Prueba ANOVA para el efecto del tratamiento y bloque sobre el índice de germinación.



Al agrupar los parámetros cuantificados en un análisis LSD podemos observar que T40-AP es el grupo predominante y se comporta como un grupo aislado al resto de tratamientos. T40-AB, T20-AP y T20-AB presentan comportamientos independientes; mientras que, entre TC-AP y TC-AB al ser controles no presentan diferencias significativas (Tabla 14).

Tabla 14.

Resultados del ensayo de fitotoxicidad a 15 días de cultivo de semillas de lechuga. Sg: Semillas germinadas, PGR: Porcentaje de germinación, CRR: Crecimiento radicular relativo, IG: Índice de germinación. Los tratamientos con las mismas letras no tienen una diferencia significativa.

Tratamiento	Sg	PGR (%)	CRR (cm)	IG (%)
T40-AP	10	100	2,90 a	198.67 a
T40-AB	10	100	2,21 b	180.31 ab
T20-AP	10	100	2,08 b	145.36 abc
T20-AB	9	90	1,34 c	115.05 bc
TC-AP	10	100	1,54 c	100,00 c
TC-AB	10	100	1,17 c	100,00 c

Análisis de elementos y Relación C/N

El diseño para todos los tratamientos contempló una relación C/N de 30 al inicio del proceso, posterior a las 12 semanas se obtuvieron los datos descritos en la Tabla 15. TC-AB y T40-AP son los ensayos con la disminución más notoria de la relación C/N, con un valor de 16, haciendo referencia a mayor madurez de la estructura del compost. TC-AP y T20-AP presentaron valores en un rango medio de 18 y 17, respectivamente; mientras que los tratamientos T20-AB y T40-AB, a pesar de mostrar una considerable disminución, tiene los valores más altos en comparación a las unidades restantes. De manera general, los tratamientos del bloque tratado con estiércol porcino (T-AP) muestran mayor madurez y estabilidad que el bloque T-AB.

Tabla 15.

Resumen de análisis de carbono, nitrógeno total y relación C/N de cada tratamiento (ANEXO 1).

Análisis	Tratamiento					
	TC-AB	T20-AB	T40-AB	TC-AP	T20-AP	T40-AP
Carbono (%)	20,1	23,4	26,2	22,8	24	18,4
Nitrógeno (%)	1,26	1,17	1,22	1,28	1,45	1,17
Relación C/N	16/1	20/1	21/1	18/1	17/1	16/1

Capítulo V: Discusión

El dimensionamiento de un sistema de compostaje conlleva un análisis exhaustivo de los materiales a utilizar, así, el uso de materiales de soporte y enmienda tienen la capacidad de mejorar tanto el proceso como la estructura resultante del compost (Torres *et al.*, 2007). El uso de aserrín como material de soporte y SGH como enmienda durante el ensayo preliminar proporcionó resultados con un comportamiento anormal en cuanto al desarrollo de la temperatura de acuerdo a lo descrito bibliográficamente. De acuerdo con Liu *et al.* (2014), la variación de temperatura de la fase mesófila a termófila da a conocer el proceso de degradación de los residuos orgánicos mediados por comunidades de microorganismos durante el compostaje. Sin embargo, los resultados obtenidos del proceso preliminar muestran degradación de los materiales a pesar de que la temperatura no superó el umbral de 45°C correspondiente a la fase termófila. Dando a entender que únicamente actuaron bacterias mesófilas durante la descomposición (<45°C), manteniéndose valores en un rango de 15,5-18,5 °C para el bloque P-AB y 16-20 °C para el P-AP.

Por otra parte, el pH del sistema tipo balde tuvo un resultado consistente a los datos presentados por Ameen *et al.* (2016), donde, durante las primeras semanas existe una disminución de pH debido a la formación de ácidos orgánicos y, posterior a esto, se da un período de estabilización y maduración del compost en un rango de pH de 6-8. Por su parte la humedad de todos los tratamientos se mantuvo en un intervalo de 40-60 ± 5, ya que fue el parámetro mejor controlado a través de la incorporación de agua cuando los valores se encontraban en el límite inferior o realizando volteos frecuentes para valores en el límite superior, procurando un porcentaje óptimo de agua del 60% como describe Wang *et al.* (2015).

Varios estudios reportan que al utilizar materiales de soporte como aserrín o paja en pilas de compostaje a gran escala se obtuvieron reducciones de hasta el 80% p/p, en un período de 150 días (Keener *et al.*, 2005), por lo que al reemplazar el aserrín del diseño preliminar por paja para el compostaje en pilas no debería significar un cambio sustancial en el proceso degradativo, sino que por el contrario, aporta mayor oxigenación, planteándose una alternativa de solución a la deficiente activación por calor presentada en el sistema tipo balde. Al comparar cada tratamiento se observó que aquellos con porcentajes de 30% y 50% de contenido de SGH mantienen los picos más altos de temperatura en su respectivo bloque, además, el bloque P-AP tuvo mejores resultados en cuanto a temperatura, pH y humedad respecto al bloque P-AB. De acuerdo con (Torres *et al.*, 2007), para procurar una mejor aireación y porosidad del sistema, y favorecer un ambiente aerobio, es fundamental tener un material de soporte que provea dichas característica, por lo que, al utilizar paja y SGH como enmienda orgánica, tenemos la premisa de un mejor producto obtenido de las pilas de compostaje. Dado que la temperatura es un parámetro determinante dentro del proceso, se tomó como referencia una media de los porcentajes mencionados para el diseño del sistema en pila, ya que los tratamientos como mejor desarrollo de temperatura mejoran el proceso de degradación e incluso la destrucción de patógenos como menciona Gao (2010).

Del análisis de resultados obtenidos del compostaje en pilas se destaca la variación de temperatura dentro de un rango bajo de valores en comparación a la teoría, a pesar de esto, el proceso degradativo es evidente para ambos bloques. Rawoteea (2017) teoriza que un factor limitante para la generación de calor por parte de los microorganismos es el tamaño de las unidades de compostaje, lo cual explica el comportamiento observado en los ensayos, ya que la cantidad utilizada en las mezclas para ambos sistemas es relativamente baja, por lo que la concentración de calor es mínima debido al intercambio que sufre con el entorno. Además, en el estudio de

Hernández (2003), los patrones de temperatura tienden a mejorar significativamente en reactores en caja a comparación de los sistemas en pilas, observándose en éste último temperaturas más bajas y distribuciones menos homogéneas.

Al contrastar los resultados de los bloques T-AB y T-AP, podemos observar que T40-AP y T40-AB presentan los picos más altos y constantes de sus respectivos bloques, sin embargo, T40-AP es el tratamiento más consistente en el aumento de temperatura. Soria (2001), menciona que el estiércol porcino contiene mayor cantidad de microorganismos y nutrientes que el bovino, además de una mayor concentración de nitrógeno, lo que sugiere que, al utilizar este tipo de estiércol la degradación de los materiales orgánicos tendrá un proceso más acelerado y consecuente generación de calor, lo cual fue observable en el comportamiento de las unidades compostadas. También, a través de pruebas estadísticas corroboramos que tanto el bloque como el tratamiento empleados son significantes para la evolución de la temperatura.

Por otra parte, la aplicación de estiércol en un sistema de compostaje tiende a producir un ambiente ácido, lo cual supone un decaimiento inicial en los valores de pH a través de la formación de ácidos orgánicos (Seijo, 2021), y posterior estabilización durante el período de maduración y enfriamiento en valores cercanos al neutro debido a la descomposición de los ácidos y la mineralización del amonio en amoníaco (Sztern & Pravia, 1999). De los tratamientos analizados se pudo observar un comportamiento acorde a lo mencionado anteriormente, donde el valor mínimo para los bloques T-AB y T-AP fue de 5,0 y los máximos 7,5 y 8,0, respectivamente. El bloque T-AB mantuvo mayor uniformidad en el comportamiento del pH, teniendo una acidificación durante las semanas 4 a 7 y posterior estabilización en valores cercanos al neutro. Por su parte, dentro del bloque T-AP, los tratamientos TC-AP y T20-AP tuvieron fluctuaciones marcadas manteniendo un valor por debajo del límite, a lo que se infiere que durante ese período de tiempo los existieron niveles bajos de oxígeno lo que produjo un incremento en la

producción de ácidos y consecuentemente su lenta degradación como menciona Sundberg (2005). En contraste, T40-AP tuvo un solo pico de acidificación de las semanas 3 a 5, seguido de su estabilización hasta el final del proceso, lo cual concuerda con el comportamiento presentado en los estudios de Zhang (2020) y Azura (2018). Cabe mencionar que los valores óptimos para el crecimiento de bacterias están entre 6,0 a 7,5 y para hongos de 5,5 a 8 (Chen *et al.*, 2011), por lo que todas las unidades a compostar mantuvieron al menos una vez un período de desarrollo de microorganismos. Además, Navia (2013) menciona que los abonos y fertilizantes de suelo deben mantener un rango de pH entre 4 y 9, lo cual está acorde a los resultados obtenidos, con valores finales de cercanos al neutro.

El agua es un componente esencial para el metabolismo microbiano, para lo cual su control fue riguroso dentro del ciclo de compostaje, con valores no superiores de 50 a 60% (Ameen *et al.*, 2016). En base a esto, el material a compostar de todos los tratamientos mantuvo un porcentaje de humedad en el rango aproximado de 40% a 60%, límites descritos por Ekinci (2006) y Camacho (2009). La reducción progresiva de humedad es un signo de descomposición y progresiva maduración del compost, lo cual fue evidenciado durante el proceso. A medida que avanzó la degradación, el porcentaje de humedad se corrigió con la adición de agua. En general, todos los tratamientos mantuvieron un contenido de humedad que facilitó el proceso de degradación; cabe mencionar que los valores sobre el límite superior en los tratamientos T20-AB, TC-AP y T20-AP no manifestaron efectos adversos, ya que como menciona Kim (2016), en estudios previos se ha sugerido que la humedad puede tener rangos óptimos de hasta 25% a 80% para sistemas con implementación de estiércol animal.

El proceso de degradación de materia orgánica conllevó una evolución en sus características organolépticas tal como menciona (Zang *et al.*, 2016), donde, al utilizar estiércol de cerdo se controlaron las emisiones de azufre y nitrógeno, especialmente

durante la fase termofílica. Estos resultados van acorde a lo observado ya que al finalizar el compostaje, sin bien no existió una degradación total, el cambio de olor fue notable en todas las unidades a compostar, infiriendo una transformación de especies nitrogenadas como el nitrato en amonio. En lo que respecta al color, es visible el cambio efectuado producto de la degradación, donde sin embargo, aún se pueden observar remanentes de los materiales iniciales. Larreategui & Banchón (2014) y Bohórquez y colaboradores (2015), mencionan en sus estudios que tradicionalmente la maduración total de un compost se da entre 12 a 24 semanas, por lo que en un período más prolongado de tiempo se podrán observar mezclas más homogéneas y de color característico, ya que la duración del ensayo presentado fue de 12 semanas.

El índice de germinación fue considerado un parámetro confiable para la evaluación de la madurez de un compost. Zhang (2020) reporta en su estudio que al utilizar compost maduros elaborados a partir de desechos de granja se pueden obtener $IG > 80\%$, lo cual está acorde a los resultados obtenidos por Guo (2012), donde al utilizar estiércol porcino se obtuvieron $IG > 85\%$. Cinco de los tratamientos empleados en este proyecto tuvieron un PGR del 100%, y el restante del 90%, dando a conocer la alta efectividad del producto. Por otra parte el IG de todos los tratamientos tuvieron un $IG > 100\%$; T20-AB y T20-AP se mantuvieron en un rango de 110 a 150%, mientras que T40-AB y T40-AP presentaron $IG > 150\%$, destacándose T40-AP al casi duplicar el efectividad del control. Este comportamiento puede deberse a que prácticamente todos los ácidos orgánicos y amoníaco se han descompuesto durante doce semanas, disminuyendo la toxicidad del medio (Gao *et al.*, 2010).

Bueno y colaboradores (2008) menciona que el metabolismo de los microorganismos descomponedores utilizan aproximadamente 30 partes de Carbono por cada una de N para un óptimo desarrollo, por lo que el intervalo óptimo para el inicio del compostaje oscila entre 25 y 35, y al finalizar el proceso es recomendable tener relaciones

$10 < C/N < 20$ para concluir la maduración del compost. Los tratamientos TC-AB, TC-AP, T20-AP y T40-AP mantuvieron valores dentro de los límites recomendados, mientras que, T20-AB y T-40-AB tienen valores muy cercanos al umbral superior. En términos generales, el uso del carbono a través de la degradación de hidrocarburos fue eficaz dentro de las unidades a compostar, además del mantenimiento del porcentaje de nitrógeno, que es fundamental para el desarrollo vegetal (Eiland *et al.*, 2001), dando a entender que los tratamientos empleados tuvieron un elevado porcentaje de maduración, ya que como reporta Yang (2013), al adicionar sustrato usado de hongo ostra, tuvo los resultados de maduración más elevados en sus ensayos, con $IG > 100\%$.

La adición de SGH como material de enmienda adiciona complejos enzimáticos remanentes de la fructificación de *Pleurotus ostreatus*, que tienen la capacidad de mejorar la degradación de materiales ricos en lignina como la paja. Yang *et al.* (2020) aislaron las enzimas: lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa y lacasa en el sustrato de crecimiento de *P. ostreatus*, cuyo resultado fue un $IG > 100\%$. Además, en el estudio de Lim y colaboradores (2013), se identificó actividad enzimática de amilasa, celulasa, lacasa y xilanasas en un sistema de compostaje utilizando el desecho de este hongo de pudrición blanca. Se puede mencionar entonces, que el efecto de estos complejos desembocaron en resultados positivos para los tratamientos empleados en este ensayo, principalmente para aquellos donde el porcentaje en peso del desecho fue mayor (T40-AB y T40-AP), por lo que estas formulaciones pueden ser suplementos potenciales para fines hortícolas.

En términos generales se puede decir que el tipo de estiércol empleado y la cantidad en peso de residuo gastado de hongo tienen una influencia directa en el comportamiento de un sistema de compostaje. A partir del análisis estadístico se comprueba que a mayor cantidad de SGH la productividad del compost aumenta, especialmente al ser complementado con estiércol porcino.

Capítulo VI: Conclusiones

Al utilizar mezclas de materiales de desecho con diferentes relaciones C/N puede resultar en sistemas de lenta degradación o que no tengan los nutrientes necesarios para el desarrollo de microorganismos descomponedores. En este estudio se obtuvo que, al utilizar mayor porcentaje en peso de SGH complementado con una proporción 1:1 de estiércol, el sistema de compostaje presentaba mejores condiciones de degradación y madurez; evidenciado en los tratamientos T20-AP y T40-AP, cuya madurez de acuerdo a su relación C/N fue la más eficaz.

Uno de los parámetros que mejor describen el proceso de compostaje es la temperatura, que está relacionada directamente con la humedad y aireación. A pesar de la evidente degradación registrada en todas las unidades a compostar, la temperatura en este proyecto no mostró valores elevados, lo cual sugiere una activación incompleta de los microorganismos presentes, actuando en su mayoría bacterias mesófilas en todo el proceso. Esta anomalía en los datos puede deberse al tamaño de los sistemas empleados o a factores externos como la humedad del ambiente. Por otra parte, tanto el pH como la humedad manifestaron un comportamiento conforme a la descripción bibliográfica, aportando en gran medida al proceso degradativo.

Al cabo de doce semanas se valuó la cantidad de nitrógeno, carbono y su relación C/N, para verificar el valor nutricional de los compost obtenidos en cada tratamiento, obteniéndose valores de $C/N < 20$ en la mayoría de los experimentos. Al estar C/N relacionado directamente con los valores independientes de carbono y nitrógeno, inferimos un equilibrio de estos elementos en las unidades compostadas, generando así un producto con buena calidad nutricional.

De los ensayos propuestos con estiércol bovino y porcino, T40-AB y T40-AP mostraron los mejores resultados en cuanto a CRR e IG, respecto a sus controles. Sin embargo, T40-AP presenta una mayor efectividad en los ensayos de fitotoxicidad y

elevada degradación de acuerdo a la valoración organoléptica, siendo la mezcla objetivo para su implementación en suelos cultivables.

Finalmente, el uso de SGH como material de enmienda propone una mejora en la calidad del sistema de compostaje propuesto, al incorporar complejos enzimáticos remanentes capaces de degradar rápidamente sustratos ricos en lignina (paja o aserrín) y, al ser complementados con estiércol porcino, obtenemos un producto con las características necesarias para utilizarlo como suplemento de suelos de producción agrícola.

Capítulo VII: Recomendaciones

En el diseño del sistema en pilas no se contemplan materiales adicionales como desechos de cocina, suelo o incluso mezcla entre varios tipos de estiércol, por lo que su implementación al sistema descrito podría ser objeto de estudio, ya que a medida que aumenta el material orgánico incorporado la cantidad de nutrientes que puede ser aportado a un suelo erosionado aumentaría gradualmente.

Por otra parte, es necesario escalar el dimensionamiento del sistema en pilas, pues como sugiere la bibliografía, al aumentar el volumen de materia orgánica la activación de microorganismos es más rápida. Además, la generación de calor durante las fases del compostaje acelerará el proceso de degradación de materiales ricos en componentes lignocelulósicos, principalmente en la fase termofílica, donde a más de ser el período más activo, se realiza un proceso de higienización al destruir posibles microorganismos patógenos.

La implementación de sistemas más controlados y automatizados de aireación y humedad pueden mejorar la degradación aerobia al mantener un flujo constante de estos requerimientos esenciales para los microorganismos.

Se propone también, un análisis nutricional más extenso en cuanto a los elementos esenciales y más significativos del compost, además de una cuantificación de metales pesados, los cuales podrían presentar un problema en este tipo de procesos.

Capítulo VIII: Bibliografía

- Al-kaisi, M. (2008). Soil Erosion , Crop Productivity and Cultural Practices. *ResearchGate*, September, 1–4.
- Alcolea, M., & González, C. (2000). Manual Compostaje En Casa. *Escuela Superior de Agricultura de Barcelona*, 1–49. <http://www.resol.com.br/cartilhas/manual-compostaje-en-casa-barcelona.pdf>
- Ameen, A., Ahmad, J., & Raza, S. (2016). Effect of pH and moisture content on composting of Municipal solid waste. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 6(5), 35–37.
- Azura, I., Baya, S., & Mohd, N. (2018). *Effect of pH, temperature and moisture content during composting of rice straw burning at different temperature with food waste and effective microorganisms. January*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183402019>
- Bohórquez, A., Puentes, Y. J., & Menjivar, J. C. (2015). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 73. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:398
- Bohórquez, W. (2019). *El proceso de compostaje* (First). Panamericana Formas e Impresos Queda. <https://ciencia.lasalle.edu.co/libros/72>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Oost, K. Van, Montanarella, L., & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Bueno, P., Díaz, M., & Cabrera, F. (2008). Factores que afectan al proceso de Compostaje. In *Compostaje* (pp. 95–105). <http://hdl.handle.net/10261/20837>
- Cajamarca, D. (2012). Procedimientos para la elaboración de abonos orgánicos.

Universidad de Cuenca, 118.

Camacho, A. (2009). *Manual de compostaje*. V.A. Impresores, S.A.

Campos, E., & Flotats, X. (2005). Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje. *Díaz de Santos y FUNIBER, January 2004*, 618–1206.
<https://doi.org/http://hdl.handle.net/2117/21395>

Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. (2015). Scientia Horticulturae Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15–27.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>

CASFS. (2021). Soils and Soil Physical Properties. *Chemical Analysis*, 158, 85–125.
<https://doi.org/10.1515/9783034611787.21>

Chen, L., De Haro Marti, M., Moore, A., & Falen, C. (2011). The Composting Process. *DAIRY COMPOST PRODUCTION AND USE IN IDAHO*.

Cogger, C. (2005). Potential compost benefits for restoration of soils disturbed by urban development. *Compost Science and Utilization*, 13(4), 243–251.
<https://doi.org/10.1080/1065657X.2005.10702248>

Dickerson, G. (2005). Backyard composting. *BioCycle*, 46(1), 45–47.

Doan, T. T., Henry-Des-Tureaux, T., Rumpel, C., Janeau, J. L., & Jouquet, P. (2015). Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: A three year mesocosm experiment. *Science of the Total Environment*, 514, 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.005>

Durazno, A. (2018). *Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.

Eiland, F., Klamer, M., Lind, A. M., Leth, M., & Bååth, E. (2001). Influence of initial C/N ratio on chemical and microbial composition during long term composting of straw.

- Microbial Ecology*, 41(3), 272–280. <https://doi.org/10.1007/s002480000071>
- Ekinci, K., Keener, H. M., & Akbolat, D. (2006). Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation. *Bioresource Technology*, 97(7), 922–932. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.025>
- Escobar, F., Sánchez, J., & Azero, M. (2012). Evaluación del proceso de compostaje con diferentes tipos de mezclas basadas en la relación C / N y la adición de preparados biodinámicos en la Granja Modelo Pairumani. *RevActaNova.*, 5, 390–410.
- FAO. (2011). *The State of the World's Land and Water Resources: Managing Systems at Risk*. <http://www.fao.org/3/i1688e/i1688e.pdf>
- FAO. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR). In *Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils*.
- Gao, M., Liang, F., Yu, A., Li, B., & Yang, L. (2010). Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios. *Chemosphere*, 78(5), 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.10.056>
- García, D., Lima, L., Ruiz, L., & Calderon, P. (2014). Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de fincas. *Revista Electrónica de La Agencia de Medio Ambiente*, 26, 1–11.
- Gómez, R. (2006). *Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso*.
- Govers, G., Merckx, R., Van Wesemael, B., & Van Oost, K. (2017). Soil conservation in the 21st century: Why we need smart agricultural intensification. *Soil*, 3(1), 45–59. <https://doi.org/10.5194/soil-3-45-2017>
- Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., & Shen, Y. (2012). Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost.

- Bioresource Technology*, 112, 171–178.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.099>
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2004.08.009>
- Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers (First). CRC Press; Taylor and Francis.
- Hernández, D., Sánchez, J. E., & Yamasaki, K. (2003). A simple procedure for preparing substrate for *Pleurotus ostreatus* cultivation. *Bioresource Technology*, 90(2), 145–150. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00118-4)
- Iglesias, E., Barral, M. T., & Marhuenda, F. C. (2008). Indicadores de estabilidad y madurez del compost. In *Compostaje*.
- INEC. (2020). Información y Tecnificación Agroambiental Módulo ESPAC Agropecuaria, 2019. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*, 27.
- INEC. (2021). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua 2020. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*, 23.
- Ionut, C. (2018). Is overgrazing really influencing soil erosion? *Water (Switzerland)*, 10(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w10081077>
- Jain, M., & Kothyari, U. (2000). Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS. *Hydrological Sciences Journal*, 45(5), 771–786.
<https://doi.org/10.1080/02626660009492376>
- Julca, A., Meneses, L., Blas, R., & Bello, S. (2006). LA MATERIA ORGÁNICA , IMPORTANCIA Y EXPERIENCIAS. *Universidad Nacional Agraria La Molina, Depto. Fitotecnia*, 49–61.
- Jurado, M., Martínèz, T., Martínez, M. J., & Saparrat, M. C. N. (2011). Application of White-Rot Fungi in Transformation, Detoxification, or Revalorization of Agriculture Wastes:

- Role of Laccase in the Processes. In *Comprehensive Biotechnology, Second Edition* (Second Edi, Vol. 6). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00398-6>
- Keener, H. M., Pecchia, J. A., Reid, G. L., Michel, F. C., & Elwell, D. L. (2005). OPTIMIZING DESIGN AND OPERATION OF DAIRY MANURE COMPOSTING SYSTEMS USING PILOT AND FULL SCALE KINETIC STUDIES. *Agricultural and Food Processing Wastes Proceedings, October*, 1–18.
- Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J. N., Pachepsky, Y., Van Der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B., & Fresco, L. O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals. *Soil*, 2(2), 111–128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>
- Kim, E., Lee, D. H., Won, S., & Ahn, H. (2016). Evaluation of optimum moisture content for composting of beef manure and bedding material mixtures using oxygen uptake measurement. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 29(5), 753–758. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0875>
- Kuramae, E. E., Yergeau, E., Wong, L. C., Pijl, A. S., Veen, J. A. Van, & Kowalchuk, G. A. (2011). Soil characteristics more strongly influence soil bacterial communities than land-use type. *Federation of European Microbiological Societies*, 2. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01192.x>
- Larreategui, E., & Banchón, C. (2014). Un modelo matemático para la reducción del tiempo de compostaje. *Scielo*, 5(2), 29–37. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v5n2.38>
- Lim, S. H., Lee, Y. H., & Kang, H. W. (2013). Efficient recovery of lignocellulolytic enzymes of spent mushroom compost from oyster mushrooms, *Pleurotus* spp., and potential use in dye decolorization. *Mycobiology*, 41(4), 214–220.

<https://doi.org/10.5941/MYCO.2013.41.4.214>

- Liu, W., Shutao, W., Jin, Z., & Tong, X. (2014). Bioresource Technology Biochar influences the microbial community structure during tomato stalk composting with chicken manure. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, *154*, 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.022>
- Liu, X., Zhang, X. Y., Wang, Y. X., Sui, Y. Y., Zhang, S. L., Herbert, S. J., & Ding, G. (2010). Soil degradation: A problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China. *Plant, Soil and Environment*, *56*(2), 87–97. <https://doi.org/10.17221/155/2009-pse>
- Luna, J. A., Córdoba, L. S., Gil, K. I., & Romero, I. M. (2013). Efecto de residuos agroforestales parcialmente biodegradados por *Pleurotus Ostreatus* (Pleurotaceae) sobre el desarrollo de plántulas de tomate. *Acta Biologica Colombiana*, *18*(2), 357–366.
- Martínez, J., Lazcano, C., Christensen, T. H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J., Antón, A., & Boldrin, A. (2013). Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *33*(4), 721–732. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0148-7>
- Massah, J., & Azadegan, B. (2016). Effect of chemical fertilizers on soil compaction and degradation. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, *47*(1), 44–50.
- Mazzarino, M. J. (2013). *De Residuos A Recursos: El Otro Camino De Los Desechos Orgánicos Urbanos. Estudio De Caso: Compostaje De Lodos Cloacales En Bariloche, Argentina*. Estructplan. <https://estructplan.com.ar/de-residuos-a-recursos-el-otro-camino-de-los-desechos-organicos-urbanos-estudio-de-caso-compostaje-de-lodos-cloacales-en-bariloche-argentina/>
- Meléndez, G., & Soto, G. (2003). Abonos Orgánicos. *Centrp de Investigaciones*

Agronómicas (CIA), UCR, 2–4.

Montalvo, C. (2013). EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO EN LA PRODUCTIVIDAD DE CINCO SECTORES AGRÍCOLAS DE LA PARROQUIA DE TUMBACO. In *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD* (Issue 1). UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD.

Moreno, L., & Cadillo, J. (2018). Uso del estiércol porcino sólido como abono orgánico en el cultivo del maíz chala. *Anales Científicos*, 79(2), 415. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i2.914>

Navia, C., Zemanate, Y., Morales, S., Prado, F., & López, N. (2013). EVALUACIÓN DE DIFERENTES FORMULACIONES DE COMPOSTAJE A PARTIR DE RESIDUOS DE COSECHA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*). *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 2(2), 165–173.

Nearing, M. A., Xie, Y., Liu, B., & Ye, Y. (2017). Natural and anthropogenic rates of soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(2), 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.04.001>

Nortcliff, S., Hulpke, H., Bannick, C. G., Terytze, K., Knoop, G., Bredemeier, M., & Schulte-Bisping, H. (2011). Soil, Definition, Function, and Utilization of Soil. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, December 2017. https://doi.org/10.1002/14356007.b07_613.pub3

Onyando, J., Kisoyan, P., & Chemelil, M. (2005). Estimation of potential soil erosion for river Perkerra catchment in Kenya. *Water Resources Management*, 19(2), 133–143. <https://doi.org/10.1007/s11269-005-2706-5>

Pace, M. G., Miller, B. E., & Farrell-Poe, K. L. (1995). The Composting Process,. *Utah State University Extension*, October, 2.

Parenti, A., Muguera, E., Redin, A., Omarini, A., Conde, E., Alfaro, M., Castanera, R., Santoyo, F., Ramírez, L., & Pisabarro, A. G. (2013). Bioresource Technology

- Induction of laccase activity in the white rot fungus *Pleurotus ostreatus* using water polluted with wheat straw extracts. *Bioresource Technology*, 133, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.072>
- Pereira, P., Brevik, E., Muñoz, M., & Miller, B. (2017). *Soil Mapping and Process Modeling for Sustainable Land Use Management* (Elsevier (ed.)). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2015-0-04597-X>
- Pettit, R. E. (2020). ORGANIC MATTER, HUMUS, HUMATE, HUMIC ACID, FULVIC ACID AND HUMIN: THEIR IMPORTANCE IN SOIL FERTILITY AND PLANT HEALTH. *Emeritus Associate Professor Texas A&M University*.
- Pointing, S. (2001). Feasibility of Bioremediation by White-Rot Fungi. *Appl Microbiol Biotechnol*, 57, 20–33. <https://doi.org/10.1007/s002530100745>
- Ramos, D., & Terry, E. (2014). Generalidades De Los Abonos Orgánicos: Importancia Del Bocashi Como Alternativa Nutricional Para Suelos Y Plantas. *Cultivos Tropicales*, 35(4), 52–59.
- Rawoteea, S. A., Mudhoo, A., & Kumar, S. (2017). Co-composting of vegetable wastes and carton: Effect of carton composition and parameter variations. *Bioresource Technology*, 227, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.019>
- Reddy, A. (1995). The potential for white-rot fungi in the treatment of pollutants. *Current Opinion in Biotechnology*, 6, 320–328. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0958-1669\(95\)80054-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0958-1669(95)80054-9)
- Richard, T., & Trautmann, N. (1996). *C/N Ratio*. Cornell Composting. Science and Engineering. http://compost.css.cornell.edu/calc/cn_ratio.html
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. In *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Rupiasih, N. N. (2005). A Review : Compositions , Structures , Properties and Applications

- of Humic Substances. *Journal of Advances in Science and Technology*, 8(June 2005), 16–25.
- Salmones, D. (2017). Pleurotus djamor , un hongo con potencial aplicación biotecnológica para el neotrópico. *Scientia Fongorum*, 46, 73–85.
- Sánchez, C. (2010). Cultivation of Pleurotus ostreatus and other edible mushrooms. *Appl Microbiol Biotechnol*, 85, 1321–1337. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2343-7>
- Sánchez, Ó. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*, 69(26), 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>
- Seijo, N. (2021). Materiales de base y formulaciones para la elaboración de compost. *EPS de Lugo-USC*.
- Silbert, V., & Olivia, A. (2018). *Manual de buenas prácticas para producir compost hogareño*.
- Soria, M., Ferrera, R., Barra, J., González, G., Santos, J., Borges, L., & Pereyda, G. (2001). PRODUCCION DE BIOFERTILIZANTES MEDIANTE BIODIGESTION DE EXCRETA LIQUIDA DE CERDO. *Terra*, 19(4), 353–362.
- Suhag, M. (2016). Potential of Biofertilizers to Replace Chemical Fertilizers. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 3(5), 163–167. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2016.3534>
- Sundberg, C. (2005). *Improving Compost Process Efficiency by Controlling Aeration , Temperature and pH*. Swedish University of Agricultural Sciences.
- Sztern, D., & Pravia, M. (1999). Manual para la elaboracion de compost bases conceptuales y procedimientos. ORGANIZACION PANAMERICANA DE LA SALUD ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD.
- Torres, P., Pérez, A., Escobar, J. C., Uribe, I. E., & Imery, R. (2007). Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Engenharia Agrícola*,

- 27(1), 267–275. <https://doi.org/10.1590/s0100-69162007000100021>
- Varnero, M. T., Quiroz, M. S., & Álvarez, C. H. (2010). Utilización de residuos forestales lignocelulósicos para producción del hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*). *Informacion Tecnologica*, 21(2), 13–20. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4154it.09>
- Vieira, F. R., Pecchia, J. A., Segato, F., & Polikarpov, I. (2019). Exploring oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) substrate preparation by varying phase I composting time: changes in bacterial communities and physicochemical composition of biomass impacting mushroom yields. *Journal of Applied Microbiology*, 126(3), 931–944. <https://doi.org/10.1111/jam.14168>
- Wang, Y., Ai, P., Cao, H., & Liu, Z. (2015). Prediction of moisture variation during composting process: A comparison of mathematical models. *Bioresource Technology*, 193, 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.100>
- Wu, C.-Y., Liang, C.-H., & Liang, Z.-C. (2020). Evaluation of Using Spent Mushroom Sawdust Wastes for Cultivation of *Auricularia polytricha*. *Agronomy*, 10(12), 1892. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121892>
- Yaguana, G., Sanchez, F., Aguilar, M., & Pozo, E. (2019). Contaminación de suelos : el caso de los plaguicidas. *FINCAYA Emprande*, 12, 1–10.
- Yang, F., Li, G. X., Yang, Q. Y., & Luo, W. H. (2013). Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Chemosphere*, 93(7), 1393–1399. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.002>
- Yang, L., Yuan, H., Yang, Y., Wang, R., Wang, C., Wei, X., Chen, S., Yu, J., & Ma, X. (2020). Enhanced Lignin Degradation in Tobacco Stalk Composting with Inoculation of White-Rot Fungi *Trametes hirsuta* and *Pleurotus ostreatus*. *Waste and Biomass Valorization*, 11(7), 3525–3535. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00692-z>
- Yang, S., Zhang, Z., Cong, L., Wang, X., & Shi, S. (2013). Effect of fulvic acid on the phosphorus availability in acid soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013,

13(3), 526–533.

Zang, B., Li, S., Michel, F., Li, G., Luo, Y., Zhang, D., & Li, Y. (2016). Effects of mix ratio, moisture content and aeration rate on sulfur odor emissions during pig manure composting. *Waste Management*, 56, 498–505. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.026>

Zhang, W. M., Yu, C. X., Wang, X. J., & Hai, L. (2020). Increased abundance of nitrogen transforming bacteria by higher C/N ratio reduces the total losses of N and C in chicken manure and corn stover mix composting. *Bioresource Technology*, 297, 122410. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122410>

