



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPUS TABASCO
POSTGRADO DE PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL
TRÓPICO

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTEO DE CACHAZA DEL INGENIO SANTA ROSALÍA DE LA CHONTALPA

CANDY DE LOS SANTOS RUÍZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS. TABASCO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRICOLAS

La presente tesis titulada: **OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTEO DE CACHAZA DEL INGENIO SANTA ROSALÍA DE LA CHONTALPA**, realizada por la estudiante: **Candy De los santos Ruiz**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

CONSEJO PARTICULAR

Profesor consejero

Dr. Adolfo Bucio Galindo

Asesor

Dr. David J. Palma López

Asesor

Dr. Samuel Córdova Sánchez

H. Cárdenas, Tabasco, México, septiembre de 2022

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTEO DE CACHAZA DEL INGENIO SANTA ROSALÍA DE LA CHONTALPA

Candy De los santos Ruiz, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

Objetivo: Optimizar el proceso de composteo de la cachaza, paja y ceniza como una alternativa para reducir la contaminación ambiental del cultivo de caña en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa, Tabasco.

Diseño/metodología/aproximación: Se utilizó un diseño experimental completamente al azar en arreglo factorial, donde los factores de estudio fueron las mezclas de compostas y los tiempos de aireación, se generaron 10 tratamientos con seis y nueve repeticiones cada uno. Las variables de estudio fueron el pH, materia orgánica (%), contenido de nitratos (NO_3^-) y amonios (NH_4^+).

Resultados: Se encontraron efectos significativos en el factor de mezcla de compostas sobre los parámetros de calidad de compostas. Los tiempos de aireación no afectaron la calidad de las diferentes mezclas de compostas. Las características químicas de pH y materia orgánica no presentaron diferencias entre los tratamientos.

Limitaciones del estudio/implicaciones: Se ha demostrado que el uso de residuos industriales de la caña de azúcar genera fertilizantes orgánicos de calidad por medio del proceso de composteo, es necesario evaluar residuos como la melaza y las vinazas.

Hallazgos/conclusiones: Los tratamientos de Cachaza 100% y, Cachaza 100% + 0.5 % de N se consideraron como los mejores tratamientos por presentar un mayor contenido de NO_3^- y NH_4^+ . Todos los tratamientos se clasificaron como compostas maduras, ricas en materia orgánica, con pH alcalinos y materiales estables.

Palabras claves: cachaza, composta, bagazo, ceniza, caña de azúcar.

OPTIMIZATION OF THE CACHAZA COMPOSING PROCESS OF INGENIO SANTA ROSALÍA DE LA CHONTALPA

Candy De los santos Ruiz, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

Objective: To optimize the composting process of sugarcane filter-pressed mud, straw and ash as an alternative to reduce environmental contamination of sugarcane cultivation in the Santa Rosalía de la Chontalpa Sugar Mill.

Design/methodology/approach: A completely randomized experimental design in a factorial arrangement was used, where the study factors were the compost mixtures and the aeration times, 10 treatments were generated with six nine repetitions each. The study variables were pH, organic matter (%), nitrate (NO_3^-) and ammonium (NH_4^+) content.

Results: Significant effects were found in the compost mix factor on compost quality parameters. Aeration times did not affect the quality of the different compost mixtures. The chemical characteristics of pH and organic matter did not present differences between the treatments.

Limitations on study/implications: It has been shown that the use of industrial residues from sugar cane generates quality organic fertilizers through the composting process, for which it is necessary to test more residues such as molasses and vinasses.

Findings/conclusions: sugarcane filter-pressed mud 100% and sugarcane filter-pressed mud 100% + 0.5% N treatments were considered the best treatments because they presented the highest amount of NO_3^- and NH_4^+ . All treatments were classified as mature composts, rich in organic matter, with alkaline pH and stable materials.

Keywords: Compost, Waste, sugarcane filter-pressed mud, Quality, Sugarcane.

Keywords: sludge, filter cake, compost, ashes, sugarcane.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgencita del Carmen.

Por permitirme llegar hasta aquí, a pesar de todas las dificultades personales a un lado de las pérdidas que la pandemia trajo consigo.

Al Colegio de Postgraduados (COLPOS) Campus-Tabasco.

Por todo lo aprendido, por todos los apoyos brindados a lo largo de este periodo importante en mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Por la beca otorgada para la realización y culminación de los trabajos, experimentos, escritos y tramites inherentes a la Maestría en Ciencias.

Al Ingenio Santa Rosalía (ISR).

Por facilitarme los materiales utilizados.

Al Dr. Sergio Salgado García.

Quien confió en este proyecto desde un inicio, lo puso en mis manos con entusiasmo, me impulso bajo presión y aplaudió cada logro, por cada consejo y enseñanza. Muchísimas gracias.

Al Dr. Adolfo Bucio Galindo.

Por todo su apoyo, disponibilidad y confianza en mi persona, siempre alegre y en busca de soluciones. Gracias

Al Dr. David J. Palma López.

Por su disponibilidad, apoyo y sugerencias para mejorar este trabajo. Gracias

Al Dr. Samuel Córdova Sánchez.

Por su confianza, por apoyarme, darme ideas y motivación. Gracias

Al MC. Sergio Salgado Velázquez.

Por su tiempo, a quien le manifiesto mi respeto y aprecio.

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgencita del Carmen.

Por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por iluminar siempre mi camino, por su amor y bondad infinita.

Al Dr. Sergio.

El que ya se ha ido, este trabajo está dedicado a usted, quien ya descansa en paz. Gracias por todo su ejemplo, su compromiso con nosotros sus estudiantes y el Colegio de Postgraduados, agradecida estoy con el creador Dios por el tiempo que nos permitió compartir.

A mi familia.

Por todo el apoyo, por los consejos, por todo su cariño incondicional a quienes amo infinitamente.

A mis amigos Manuel, Miguel Arturo, Alejandro.

A quienes deseo expresar profundo aprecio, por su motivación, su apoyo en todo momento, tanto moral como en campo durante el establecimiento del experimento, por toda su humildad y confianza en mi persona. Los quiero.

A Iris.

Por siempre darme palabras de aliento, por todo tu cariño sincero, en quien he podido confiar siempre.

A Liliana.

Por ese cariño sincero, por todo lo vivido juntas.

A mis maestros.

Por su gran apoyo y motivación para lograr esta nueva etapa profesional, por sus ideas en la elaboración de esta tesis, por compartir su tiempo, experiencias y conocimientos.

A Jesús

Por todo tu apoyo en campo y disponibilidad para trabajar conmigo.

A Heydi

Por todo tu apoyo, por todas tus palabras de motivación durante tu estancia en el laboratorio de alimentos. Te deseo todos los éxitos.

“Lo que hagas hazlo con alegría, hazte maestro y alumno de tu propia vida, desarrolla el método mayéutico y disfruta los grandes conocimientos de la vida”.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
CONTENIDO	vii
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
III. JUSTIFICACIÓN	3
IV. OBJETIVOS	4
V. HIPÓTESIS	4
VI. REVISIÓN DE LITERATURA	5
6.1. La composta	5
6.2. La cachaza	5
6.3. Composteo de cachaza	6
6.4. Calidad de composta	7
6.5. Características químicas de la composta	8
6.6. Inocuidad de composta	8
6.7. Algunos trabajos sobre el tema de investigación	10
VII. MATERIALES Y MÉTODOS	16
7.1. Procedencia de los materiales de la composta.....	16
7.2. Sitio experimental	16
7.3. Tratamientos y diseño experimental	17
7.4. Manejo del proceso de composteo	18
7.5. Variables de estudio	19
7.6. Análisis estadístico	20
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
8.1. Características físicas y químicas de la composta de cachaza	21
8.2. Monitoreo del proceso de composteo	27
IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	30

X. LITERATURA CITADA.....	31
---------------------------	----

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Principales propiedades de muestras de composta de autocompostaje de diversos orígenes.....	8
Cuadro 2. Tratamientos en estudio de diferentes mezclas y tiempos de aireación.....	17
Cuadro 3. Cuadrados medios del ANOVA de propiedades químicas de las diferentes mezclas de compostas y tiempos de aireación en estudio.....	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Google Earth (2021). Imagen de satélite de la ubicación del sitio experimental, donde se estableció el proceso de composteo en las instalaciones de la Universidad Popular de la Chontalpa, Cárdenas Tabasco. Consulta: 23 de abril del 2021, desde: http://earth.google.com	17
Figura 2. Distribución de tratamientos al azar según su numeración en el sitio experimental. Cada número representa a una unidad experimental de un tratamiento (10 tratamientos con 6 repeticiones=60 unidades experimentales)....	18
Figura 3. a) Mezcla de los tratamientos y b) tratamientos tapados.	18
Figura 4. Proceso de toma de muestras: a) toma de muestra y b) rotulación de la muestra enviada a laboratorio cada 30 días.....	19
Figura 5. Detalles del proceso de toma de medición de la temperatura y pH en la parte media del tratamiento.....	20
Figura 6. Comparación de medias de Tukey del potencial hidrogeno (pH) de las diferentes mezclas de compostas y tiempos de aireación en estudio. Medias con la misma literal son iguales estadísticamente.	23
Figura 7. Comparación de medias de Tukey del contenido de materia orgánica (MO, %) de las diferentes mezclas de compostas y tiempos de aireación en estudio. Medias con la misma literal son iguales estadísticamente.	24
Figura 8. Comparación de medias de Tukey de nitratos (NO_3^- , ppm) de las diferentes mezclas de compostas y tiempos de aireación en estudio (medias con la misma literal son iguales estadísticamente).	25
Figura 9. Comparación de medias de Tukey de amonio (NH_4^+ , ppm) de las diferentes mezclas de compostas y tiempos de aireación en estudio (medias con la misma literal son iguales estadísticamente).	26
Figura 10. Registro de la temperatura durante el proceso del composteo a base de cachaza de las diferentes mezclas de compostas en estudio.....	27

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

El cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es importante en México, ya que genera divisas y mano de obra; y aun cuando sus rendimientos no son óptimos, tiene ingresos importantes para quienes realizan esta actividad (Váldez et al., 2009; Domínguez Gamas et al., 2018). En Tabasco, en la región de la Chontalpa, se encuentra el Ingenio Santa Rosalía (ISR), el que en los últimos años ha incrementado su superficie cultivada, de 9,038 a 13,012 ha de 2007 a la fecha, y los rendimientos de caña de 41.6 a 67 t ha⁻¹, aunque aún son inferiores a la media nacional de 68.7 t ha⁻¹ (CONADESUCA, 2019). Con el fin de aumentar la productividad de los suelos, los suelos cultivados con caña de azúcar en México y en el estado de Tabasco, han sido sometidos al uso excesivo de fertilizantes, la quema y mecanización. Por consecuencia se incide en la reducción de la materia orgánica del suelo, incremento de la erosión y disminución de la densidad de poblaciones microbianas benéficas para el cultivo (Palma-López et al., 2016ab). Actualmente es de gran importancia el uso de alternativas que permitan recuperar los suelos, y dentro de éstas se encuentra el uso de compostas o abonos orgánicos, biofertilizantes, abonos verdes y coberteras (Pérez et al., 2011). En el estado de Tabasco existen gran cantidad de materia orgánica excedente por actividades agroindustriales, como los Ingenios azucareros, donde se genera vinaza, el bagazo y la cachaza. A pesar de que se utiliza la cachaza, en este Ingenio no se ha logrado optimizar el composteo de cachaza ya que se cuentan con poca experiencia con respecto al manejo, por ello surge la necesidad de generar la información sobre el composteo de la cachaza con la finalidad de reducir costos de producción y de aplicación (Salgado et al., 2013). El aporte de estas enmiendas al suelo puede ayudar a conservar y fomentar la estructura, debido a que la materia orgánica es considerada como un agente activo que favorece la agregación a través de mecanismos físicos y químicos, sobre todo en suelos arcillosos característicos del área de abastecimiento del ISR como los Vertisoles, Fluvisoles y Gleysols, donde se presentan problemas de una baja agregación y deficiente drenaje (Sánchez-Hernández et al., 2005; Salgado et al., 2013; Palma-López et al., 2016ab).

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa (ISR) del estado de Tabasco, la superficie cultivada se ha incrementado de 9,038 a 12,100 ha de 2006 a la fecha, los rendimientos de caña fluctúan de 41.64 a 67.1 t ha⁻¹, los cuales son inferiores a la media nacional de 68.7 t ha⁻¹(CONADESUCA, 2019). La fertilización del cultivo de caña de azúcar en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa ha sido esporádica y en dosis menores a las recomendadas por Salgado *et al.* (2004). El manejo inadecuado de la fertilización y las quemadas y requemadas ha ocasionado el empobrecimiento de los suelos (Armida-Alcudia *et al.*, 2005). Una alternativa para aumentar la fertilidad del suelo es la reincorporación de la cachaza, que se genera como subproducto en la obtención de azúcar. A pesar de que se utiliza la cachaza, en este Ingenio no se ha logrado optimizar el composteo de cachaza ya que se cuenta con poca experiencia con respecto al manejo, por ello es necesario generar experiencia sobre el composteo de la cachaza, para reducir costos de producción y reducir costos de aplicación (Salgado *et al.*, 2013).

III. JUSTIFICACIÓN

El cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo importante en México, genera divisas y mano de obra; y aun cuando sus rendimientos no son óptimos, tiene ingresos importantes para quienes realizan esta actividad (Domínguez Gamas *et al.*, 2018). En Tabasco, en la región de la Chontalpa, se encuentra el Ingenio Santa Rosalía (ISR), que en los últimos años ha incrementado su superficie cultivada, de 9,038 a 15,042 ha de 2007 a la fecha, y los rendimientos de caña de 41.6 a 67 t ha⁻¹, aunque aún son inferiores a la media nacional de 68.7 t ha⁻¹ (CONADESUCA, 2019). Por ello, los suelos cultivados con caña de azúcar en México y en el estado de Tabasco, han sido sometidos a manejo intensivo para sostener y aumentar la producción; el uso excesivo de fertilizantes, la quema y mecanización son utilizados para aumentar la productividad de los suelos, lo que por consecuencia incide en la reducción de la materia orgánica del suelo, incremento de la erosión y disminución de la densidad de poblaciones microbianas benéficas para el cultivo (Palma-López *et al.*, 2016b). El aporte de cachaza composteada al suelo mejora su estructura, debido a que la materia orgánica es considerada como un agente activo que favorece la agregación a través de mecanismos físicos y químicos, sobre todo en suelos arcillosos característicos del área de abastecimiento del ISR como los Vertisoles, Fluvisoles y Gleysoles, donde se presentan problemas de una baja agregación y deficiente drenaje debidos a un inadecuado manejo agronómico (Sánchez Hernández *et al.*, 2005; Palma-López *et al.*, 2016a; Salgado *et al.*, 2013).

IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Optimizar el proceso de composteo de la cachaza como una alternativa para reducir la contaminación ambiental del cultivo de caña en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

Objetivos específicos

- a) Determinar las características químicas: pH, MO, NH_4^+ , NO_3^- que intervienen en el proceso de composteo a base de cachaza, ceniza, bagazo y paja proveniente del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.
- b) Caracterizar los parámetros físicos que intervienen en el proceso de composteo: temperatura y pH en el proceso de la elaboración de la composta a base de cachaza, ceniza, bagazo y paja proveniente del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

V. HIPÓTESIS

5.1. Hipótesis general

A partir de los procesos de composteo utilizados es factible generar un proceso para optimizar el composteo de la bagazo, cachaza, ceniza y paja de caña en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.

5.2. Hipótesis específicas

- a) La temperatura durante el proceso de composteo se mantiene en los intervalos adecuados para optimizar el composteo elaborado a base de cachaza, paja y ceniza proveniente del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa.
- b) La composta elaborada a partir de cachaza, paja y ceniza, presenta buenas propiedades químicas.

VI. REVISIÓN DE LITERATURA

6.1. La composta

La composta es un proceso de descomposición de residuos orgánicos que mineraliza la materia orgánica por acción de microorganismos (Danva, 2000) que pueden ser adventicios o ser inoculados, requiere de un ambiente cálido y húmedo que favorezca un medio aeróbico para la acción microbiana. El proceso de composteo transforma los compuestos orgánicos en compuestos más estables, con altos contenidos de humus y nutrientes más solubles, que aplicados como fertilizantes orgánicos mejoran las características físicas de los suelos y sustituyen parcial o totalmente los fertilizantes minerales (Cuellar *et al.*, 2002).

6.2. La cachaza

Es el residuo en forma de lodo que se elimina en el proceso de clarificación del jugo de caña (Córdova-Gamas *et al.*, 2016). Se genera durante la purificación del azúcar por proceso de carbonatación o sulfitación. En el proceso se separa jugo claro en la parte superior y lodo en la parte inferior. En general, cuando se trituran 100 t de caña de azúcar, se producen como subproducto unas 3 t de lodo de prensa (Gupta *et al.* 2011). Es de color marrón oscuro, constituido por una mezcla de fibra de caña, sacarosa, coloides, coagulados, incluyendo la cera, fosfato de calcio y partículas de suelo (Instituto Cubano de Investigación de los Derivados de Caña de Azúcar, 1993; Córdova-Gamas *et al.*, 2016). La cachaza es rica en materia orgánica, calcio, fósforo y nitrógeno según Planalsucar (1983), cuando la cachaza es aplicada al suelo en dosis elevadas presenta propiedades correctivas de la acidez en el suelo, esto debido a los beneficios de la materia orgánica sobre el aluminio ya que este genera toxicidad, por otro lado, ventaja sobre el calcio ya que provoca menor alteración en el balance catiónico del suelo.

6.3. Composteo de cachaza

Dentro de los parámetros de los procesos más relevantes se encuentra la temperatura que es el que mejor indicador del desarrollo del proceso. El proceso cuenta con cuatro fases:

1. **Fase Mesófila.** El material de partida comienza el proceso de compostaje a temperatura ambiente y en pocos días (e incluso en horas), la temperatura aumenta hasta los 45°C. Este aumento de temperatura es debido a actividad microbiana, ya que en esta fase los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de C y N generando calor. La descomposición de compuestos solubles, como azúcares, produce ácidos orgánicos y, por tanto, el pH puede bajar (hasta cerca de 4.0 o 4.5). Esta fase dura pocos días (entre dos y ocho días) (Román *et al.*, 2013).
2. **Fase Termófila o de Higienización.** Cuando el material alcanza temperaturas mayores que los 45°C, los microorganismos que se desarrollan a temperaturas medias (microorganismos mesófilos), son reemplazados por aquellos que crecen a mayores temperaturas, en su mayoría bacterias termófilas, que actúan facilitando la degradación de fuentes más complejas de C, como la celulosa y la lignina. Estos microorganismos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH del medio sube. En especial, a partir de los 60°C aparecen las bacterias que producen esporas y actinobacterias, que son las encargadas de descomponer las ceras, hemicelulosas y otros compuestos de C complejos. Esta fase puede durar desde unos días hasta meses, según el material de partida, las condiciones climáticas y del lugar, y otros factores. Esta fase también recibe el nombre de fase de higienización ya que el calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella* spp. En esta fase es importante la temperatura por encima de los 55°C que se eliminan los quistes y huevos de helminto, Hongo indicador de la fase mesófila II (Martínez-Blanco *et al.*, 2013) y las esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malezas que pueden encontrarse en el material de partida, dando lugar a un producto higienizado (Román *et al.*, 2013).

3. **Fase de Enfriamiento o Mesófila II.** Agotadas las fuentes de carbono y, en especial el nitrógeno en el material en compostaje, la temperatura desciende nuevamente hasta los 40-45°C. Durante esta fase, continúa la degradación de polímeros como la celulosa, y aparecen algunos hongos visibles a simple vista. Al bajar de 40°C, los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente, aunque en general el pH se mantiene ligeramente alcalino. Esta fase de enfriamiento requiere de varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración (Román *et al.*, 2013).

4. **Fase de Maduración.** Es un período que demora más a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos (Román *et al.*, 2013).

6.4. Calidad de composta

Durante el compostaje, los desechos biodegradables se transforman en el producto de composta estable, que proporciona beneficios valiosos para el crecimiento de las plantas al aumentar la fertilidad del suelo. Sin embargo, dependiendo del origen de la materia prima y la gestión del proceso, el compostaje también puede contener sustancias nocivas para el medio ambiente, como agentes patógenos, metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos. Los patógenos pueden ser virus, bacterias, hongos, protozoos, nematodos y helmintos. Los patógenos están comúnmente presentes en lodos de depuradora, desechos domésticos y desechos de jardín, en los cuales son comúnmente composteados (Martínez-Blanco *et al.*, 2013).

El compostaje es un método eficiente para la destrucción de patógenos. Sin embargo, para eliminar o reducir la presencia de agentes patógenos en la composta a un nivel aceptable para que el uso de la composta sea seguro para humanos, animales y plantas, es importante que el proceso esté bien administrado (Martínez-Blanco *et al.*, 2013).

6.5. Características químicas de la composta

En el Cuadro 1, se resumen los valores de los principales parámetros fisicoquímicos que se vienen determinando en Gipuzkoa para valorar la calidad de la composta. Los resultados se refieren tanto a muestras aleatorias de control tomadas al azar entre los miembros de la Red de Compostaje doméstico de Gipuzkoa como a las de los participantes en las sucesivas ediciones del Premio de compostaje (Ansorena, 2016), que se comparan con los resultados de las regiones de Flandes y de Rennes (VLACO, 2006).

Cuadro 1. Principales propiedades de muestras de composta de autocompostaje de diversos orígenes.

Parámetro	Unidad	Muestras de control		Muestras de Premio		Flandes	Rennes
		Media	Intervalo	Media	Intervalo		
pH		8.9	(5,5-9,0)	8.30	(8,20-10,0)	8.20	8.1
CE	uS/cm	2150	(349-8800)	2350	(270-9840)	2065	-
Humedad	%	62.1	(20,0-81,2)	63.1	(25,1-82,4)	63.2	65.7
M.O.	%	44.5	(11,293,8)	43.8	(9,54-85,3)	44.8	46.8
N. Total	%.	2.25	(0,56-9,1)	1.60	(0,14-4,13)	1.85	2.02
C/N		14.2	(3,2-46,1)	14.0	(8,6-42,9)	12.1	13.7

*Muestras de control (n= 100, *n=34). Muestras de premio (n=237). Fuente: Ansorena (2016).

6.6. Inocuidad de composta

Como consecuencia de las elevadas temperaturas alcanzadas durante la fase termofílica, se destruyen las bacterias patógenas y parásitos presentes en los residuos de partida. En esta fase se da la inocuidad del material (Quiñones *et al.*, 2019). En las fases siguientes podría ocurrir una re-contaminación del material debido a varios factores, como, por ejemplo, la utilización de utensilios contaminados con material fresco, como una pala para el volteo, o añadiendo material fresco después de la fase termofílica (Callizaya Estrada, 2019). Un compost maduro no debe contener compuestos tóxicos para las plantas o el ambiente (Wichuk y McCartney, 2010). Así, por ejemplo, la presencia de amoníaco y sulfatos (NH_3 y SO_4) en lixiviados generados por procesos de compostaje con exceso de humedad, favorecen la producción de ácido sulfhídrico y dióxido de nitrógeno (H_2S

y NO₂) que, junto con el metano, (CH₄), son considerados gases efecto invernadero (GEI) con importantes impactos negativos en el medio ambiente, y en especial en el cambio climático (Manyi-Loh *et al.*, 2016). En diferentes países latinoamericanos basados tanto en estándares de Estados Unidos (EPA) como de la Unión Europea (EU), han desarrollado normativas para definir la calidad de la composta y su uso. Chile, Colombia, México, además de definir la calidad de la composta, diferencian en dos clases, A y B, con o sin restricciones de uso, basados en la presencia de patógenos y metales pesados (Ansorena *et al.*, 2014).

La inocuidad biológica de la composta, depende de la temperatura que alcance el material, pero también de la humedad, la aireación. En una pila con adecuada humedad, la actividad microbiana hace que la temperatura se incremente, siendo mayor en el interior que en el exterior (Gong, 2007). De esta forma, al airear la pila o al realizar el volteo, se homogeniza la temperatura y la humedad y se pueden eliminar patógenos (Gong, 2007).

La fertilización química es una actividad necesaria en la producción agrícola para incrementar el rendimiento y la calidad de los cultivos. Esto ha permitido mayor volumen de producción de alimentos a nivel mundial en los últimos 110 años (Salgado *et al.*, 2000; Salgado *et al.*, 2003), sin embargo, a pesar de tal beneficio su uso también ha contribuido al deterioro de los recursos naturales, propiciando alteraciones en la biodiversidad.

Por otro lado, los residuos sólidos que se generan durante el proceso productivo de la caña de azúcar se pueden clasificar en: tierra, restos de plantas, bagazo, cachaza y ceniza (Salgado *et al.*, 2013a); la cachaza es un residuo de la industria azucarera que se forma a partir de los lodos formados por las impurezas, ceras, hidrocarburos y azúcares que aporta la caña (Hernández *et al.*, 2008; Quiroz y Pérez, 2013). La ceniza se genera en caldera al quemarse el bagazo como combustible. Por cada tonelada de caña procesada en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa se genera 25-30 kg de cachaza, 250 kg de bagazo y 7 kg de ceniza (Salgado *et al.*, 2013b).

Las 46,530 t de cachaza y las 10,857 t de ceniza generadas por zafra en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa, representan un problema por las grandes áreas que se requieren para su almacenamiento, además, genera mal olor y, en muchas ocasiones, es un foco de infección y un riesgo para la conservación del ambiente (Arreola-Enríquez, 2004), a través del proceso de composteo se puede mejorar el valor nutrimental y se reduce el volumen de aplicación. La aplicación de 10 t ha⁻¹ de composta de cachaza en las 11 subunidades de suelo en el Ingenio Cia La Fe Pujiltic, permitieron obtener rendimientos de caña de azúcar similar a los obtenidos con la fertilización química (Salgado *et al.*, 2014). Este mismo efecto fue reportado en un suelo Cambisol fluvico (Arcílico Éutrico) del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa, al comparar la fertilización química 120-60-80 contra la fertilización orgánica a base de 10 t ha⁻¹ de cachaza (Córdova *et al.*, 2016).

6.7. Algunos trabajos sobre el tema de investigación

La industria de la caña de azúcar genera grandes cantidades de residuos sólidos, como cachaza y cenizas. Si estos residuos orgánicos no se eliminan correctamente, pueden convertirse en una fuente de contaminación ambiental e incluso pueden causar problemas de salud pública (Estrada-Bonilla *et al.*, 2017). Por lo tanto, el compostaje es un método importante para el manejo de los residuos producidos por la industria de la caña de azúcar. Cuando se aplica sobre el suelo, la composta resultante mejora las propiedades físicas del suelo, aumentando su porosidad y capacidad de retención de agua. También altera las características químicas y microbiológicas del suelo, enriqueciéndolo con sustancias húmicas y macro y micronutrientes (Estrada-Bonilla *et al.*, 2017). Se pueden utilizar en la agricultura para reducir el requisito de fertilizantes químicos (Dotaniya *et al.*, 2016).

En un estudio reciente en la India se hizo una estimación del valor nutricional de los componentes de derivados de la industria cañera; y se hizo un cálculo acerca de que, si todo el lodo de la prensa se reciclara a través de la agricultura, podrían estar disponibles alrededor de 32 464, 28 077, 14 038, 3434, 393, 1030 y 240 toneladas (t) de N, P, K, Fe, Zn, Mn y Cu, respectivamente, y que ayudaría a ahorrar costosos fertilizantes químicos (Dotaniya *et al.*, 2016).

Ya existen antecedentes en el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa con el proceso de composteo, incluso cuentan con instalaciones adecuadas para la realización de las labores requeridas para el proceso del compostaje, pero carecen de manejo apropiado, la validación, la distribución y aplicación en campo, además, que desconocen de la optimización que puede tener la composta como fertilizante orgánico. En el Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa en la zafra 2018-2019 se procesaron 806, 117 toneladas de tallos molidos de caña de azúcar (CONADESUCA, 2019), considerando que por una tonelada de caña procesada se generan entre 3 y 5% de cachaza por tonelada de tallos molidos (García-Torres *et al.*, 2011), el volumen potencial de cachaza para ser composteada es de 28,125 toneladas de cachaza.

Se evaluaron los efectos de tres dosis de cachaza enriquecida con N (0.6%) y K (0.2%) sobre las propiedades del suelo, el rendimiento y la calidad del jugo de caña azúcar, además de la fórmula de fertilización convencional y un testigo, con un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. Los resultados indican que el suelo mejoró sus propiedades químicas con respecto al testigo absoluto y los tratamientos con 10 y 15 t ha⁻¹ de abono órgano-mineral de cachaza (AOMC) fueron los que respondieron en un incremento en variables, como: materia orgánica (15 y 24%), pH (6 y 8%), N total (48 y 70%), N mineral (144 y 162%), P (300 y 461%) y K (46 y 47%). Asimismo, el rendimiento de caña se incrementó significativamente cuando se fertilizó con 10 t ha⁻¹ de AOMC (84.6 t ha⁻¹), en comparación con el testigo y la fertilización química (35 y 52 t ha⁻¹, respectivamente. Por otra parte, la calidad del jugo (grados Brix, sacarosa, pureza y fibra) no mostró efecto de tratamientos, por lo que se puede deducir que con 10 y 15 t ha⁻¹ AOMC es posible incrementar el rendimiento de caña de azúcar sin afectar la calidad del jugo y, simultáneamente, evitar la actual contaminación ambiental provocada por los fertilizantes químicos utilizados en este cultivo (Arreola-Enríquez *et al.*, 2004).

El efecto de la adición de vermicompost de cachaza fue evaluado sobre las propiedades físicas de un suelo vertisol en la región de la Chontalpa, Tabasco. El

vermicompost fue aplicado en enero de 2003 y se mantuvo sin alteración mecánica durante 18 meses. En junio de 2004 fueron medidos la densidad aparente, la distribución y estabilidad de agregados en seco y húmedo, y el carbono total (Ct) asociado a cada tamaño de agregado, y se elaboraron laminas delgadas. Microagregados y macroagregados de los tratamientos de 0 y 60 t ha⁻¹ se visualizaron mediante microscopía electrónica. Los resultados indicaron que la densidad aparente disminuyó con el incremento de la dosis de vermicompost ($r = 0.99$; $p = 0.06$). A través de las láminas delgadas, se observó un cambio en la estructura de la superficie del suelo en los tratamientos de 40 y 60 t ha⁻¹. En ambos tratamientos los macroagregados y el espacio poroso fueron más abundantes. Los resultados de los fraccionamientos por tamaño de agregados, tanto en seco como en húmedo, indicaron que hubo más macroagregados estables en los suelos que recibieron mayores dosis de la enmienda orgánica. La mayor cantidad de Ct se asoció con los macroagregados de entre 250 - 500 μm , mientras que a los microagregados ($< 250 \mu\text{m}$) se asoció menos Ct. La observación de microagregados y macroagregados por microscopía electrónica indicó una ausencia de materia orgánica particulada y macroagregados compuestos por una mayor cantidad de microagregados en el tratamiento de 60 t ha⁻¹ (Sánchez-Hernández *et al.*, 2006).

Se evaluó el efecto de la vinaza y composta de cachaza sobre las propiedades químicas del suelo, en la nutrición del cultivo, el rendimiento de caña, la calidad de los jugos y en el análisis comparativo de los costos de su uso como abonos orgánicos. El experimento fue realizado en el Ingenio Pujilic, en Chiapas, México. Los tratamientos evaluados fueron vinaza de 150 y 250 m³·ha⁻¹, fertilización química NPK (160-80-80), composta de cachaza de 15t·ha⁻¹ y un testigo, utilizando análisis de varianza. Los resultados muestran que las aplicaciones de vinaza y composta no afectaron el pH, la conductividad eléctrica ni la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Se observó que los tratamientos de vinaza de 250 m³·ha⁻¹ y composta de cachaza incrementaron los niveles de materia orgánica, K y P en el suelo. No se encontraron diferencias significativas en el rendimiento de tallos y la calidad de los

jugos no se vio afectada. Los efectos de la vinaza y composta de cachaza sobre el suelo no afectaron sus propiedades químicas (Hernández-Melchor *et al.*, 2008).

Diferentes mezclas de bagazo y cachaza de caña fueron sometidas a compostaje para caracterizar el proceso de la degradación controlada y evaluar el aporte de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ como fuente de nutrientes, así como para seleccionar variables químicas indicadoras de madurez de la composta. El aumento del bagazo en los sustratos mantuvo mayor porcentaje de humedad y redujo la temperatura. En la mayoría de los tratamientos, la fase termofílica del compostaje no se manifestó porque la pérdida de calor superó la ganancia térmica, debido particularmente al pequeño tamaño de las pilas. En la mayoría de los tratamientos la temperatura se estabilizó a los 113 días del compostaje. La adición de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ provocó disminución del pH e incrementó la conductividad eléctrica, NH_4^+ y NO_3^- . Como material compostado se consideró el material fraccionado físicamente a partículas $<2\text{mm}$. La cachaza fue compostada más rápidamente que el bagazo por su menor relación C/N, mientras que el bagazo fue degradado más lentamente y aumentó la capacidad de intercambio de cationes (CIC). De las variables consideradas como indicadoras de madurez de las compostas se recomiendan aquellas asociadas a las etapas del compostaje; entre ellas, la disminución de temperatura después de la fase termofílica, la producción de NH_4^+ durante la fase termofílica, el incremento de NO_3^- durante la fase mesofílica, y el incremento de la CIC durante la síntesis de sustancias húmicas, particularmente en residuos con alta relación C/N, en los cuales se recomienda el uso de activadores biológicos como el $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, que no son necesarios en sustratos con baja relación C/N (Méndez *et al.*, 2011).

La utilización de abonos a base de cachaza vermicompostada y compostada y la composta del productor mejoraron los contenidos de MO, Nt, P, K y Ca, y aumentan el pH en las dos plantaciones de cacao. Durante la época de secas se presenta una reducción en los contenidos de MO, Nt, Ca y el pH. Los tres tipos de abonos presentaron mejor efecto sobre los contenidos nutrimentales en los suelos cacaoteros cuando se aplicaron de manera enterrada (Triano-Sánchez *et al.*, 2016).

Durante dos bioensayos se comparó la efectividad de la cachaza (CA) y el estiércol de pollo (EP) en la enmendación de tres suelos restaurados (SR1, SR2 y SR3) tras la contaminación por fuga de petróleo crudo. El efecto de ambos fertilizantes orgánicos (FO) se midió en la respuesta de la planta de rábano, las propiedades físicas y químicas del suelo, el carbono de la biomasa microbiana y las densidades de rizobacterias fijadoras de N y solubilizadoras de fosfatos. La altura de la planta, biomasa del bulbo y acumulación de N y P en suelo y en follaje aumentaron (Tukey; $p \leq 0,05$) con la adición de CA y de EP en el suelo testigo (ST) y en SR3 (Trujillo-Narcía *et al.*, 2014).

Se evaluó la calidad nutrimental de diferentes tipos de vermicompostas elaboradas con base en residuos (cachaza y bagazo) de la agroindustria de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) mezclados con diferentes fuentes de estiércol (gallina, caballo, vaca y borrego), sometidas a vermicompostaje por tres meses con lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*), registrando un valor de pH y materia orgánica en el rango aceptable de la norma mexicana, mientras que la conductividad eléctrica y la Relación C/N fueron superiores al rango aceptable y el nitrógeno total fue inferior a la norma. La relación % de ácidos húmicos entre % de ácidos fúlvicos (AH/AF) se registró en concentraciones elevadas en todos los tratamientos. Se evidenció que los mejores tratamientos fueron los adicionados con estiércol de borrego y vaca (Palma-López *et al.*, 2016a).

Una alternativa para solucionar el problema de los residuos agroindustriales es el composteo, por ello el objetivo de este trabajo fue caracterizar químicamente las compostas elaboradas con subproductos agroindustriales y enriquecidas con guano de murciélago. Para generar los tratamientos de composta, se utilizó un diseño factorial 3x4 con cachaza de caña de azúcar (*Saccharum spp.*), desecho de plátano (*Musa sp.*), cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.), en cantidades de 20, 30, 40 y 50 kg cada uno; y 30, 20, 10 y 0 kg de guano de murciélago en presentación comercial. Se utilizó el proceso Indore con cuatro repeticiones. Para el control de

madurez se evaluó la temperatura, humedad, y relación amonio/nitrato. Los cambios de temperatura durante el proceso de composteo permitieron identificar las fases mesófila, termófila y mesófila; la humedad y la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ confirmaron la madurez de las compostas a los 102 días, y el pH varió de ácido a alcalino, considerado como benéfico para aplicaciones diferenciadas al suelo. Los valores de pH, CE, MO, N, y Humedad, así como los contenidos de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn de las compostas, sugieren buena calidad para suministro al suelo (Palma-López *et al.*, 2016b).

Para el módulo del Campus Tabasco, se utilizaron subproductos de origen agroindustrial (cachaza de caña de azúcar) y de procedencia animal (estiércol vacuno), estos materiales fueron composteados previamente a su utilización, posteriormente se mezclaron con tierra de acahual (hojarasca) y suelo del mismo lugar para ser utilizados en un sistema de producción organopónico de 14 especies de hortalizas. Este sistema de cultivo superó las expectativas, al proyectarlo a rendimientos por hectárea se estimaron 55 t ha⁻¹ para tomate, chiles de 40 a 50 t ha⁻¹, cilantro hasta 21.5 t ha⁻¹, pepino 35 t ha⁻¹, superando a los rendimientos reportados por el manejo convencional (Palma-López *et al.*, 2017).

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Procedencia de los materiales de la composta

La colecta de los materiales para el proceso de composteo se llevó a cabo en el mes de mayo de 2021, previo a la terminación de la zafra del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa, Cárdenas Tabasco 2019-2020, y se efectuó de la siguiente forma: La cachaza recién generada se obtuvo del Ingenio Santa Rosalía. Las puntas de caña se colectaron cuatro días después de haberse realizado la cosecha de una parcela comercial. La ceniza, se obtuvo de la caldera del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa. La urea que se aplicó fue de la marca FYPA que tiene 46% de nitrógeno.

Cachaza. Se solicitó un volteo de 4 m³ de cachaza al Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa, recién generada y se transportó al área de las unidades experimentales de la Universidad Popular de la Chontalpa ubicado en el municipio de Cárdenas, Tabasco. Tramo carretero Cárdenas - Huimanguillo Km. 2.0. Cárdenas, Tabasco México. Este material se mantuvo a la intemperie durante 30 días para facilitar su enfriamiento (precomposteo).

Puntas de caña. Se colectaron 300 kg de punta de caña de una parcela comercial después de haberse realizado la cosecha (4 días de exposición al sol). Para fraccionar este material se utilizó una picadora de forraje.

Ceniza. La ceniza es el resultado de la quema del bagazo en la caldera del Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa, se colectaron 300 kg.

7.2. Sitio experimental

El proceso de composteo se estableció bajo techo en las instalaciones de la Universidad Popular de la Chontalpa ubicada en el municipio de Cárdenas, Tabasco. Tramo carretero Cárdenas - Huimanguillo Km. 2.0. Cárdenas, Tabasco México.



Figura 1. Google Earth (2021). Imagen de satélite de la ubicación del sitio experimental, donde se estableció el proceso de composteo en las instalaciones de la Universidad Popular de la Chontalpa, Cárdenas Tabasco. Consulta: 23 de abril del 2021, desde: <http://earth.google.com>

7.3. Tratamientos y diseño experimental

Para generar los tratamientos, se utilizó un diseño completamente al azar en arreglo factorial 5x2 (Cinco mezclas de composta de residuos de caña de azúcar, y dos tiempos de aireación: 7 y 14 días), lo cual generó 10 tratamientos (Cuadro 1), los que se distribuyeron al azar en el sitio experimental, con seis repeticiones (Figura 2). Se generaron 60 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió en 38 kg. Para mezclar los compuestos de las diferentes unidades experimentales se utilizó una cubeta de 20 litros y una balanza para la referencia de mediciones. Para aplicar la cachaza, se utilizó únicamente la balanza.

Cuadro 2. Tratamientos en estudio de diferentes mezclas y tiempos de aireación.

Num. Trat.	Mezcla de compost	Tiempo de aireación (días)
1.	Cachaza 100%	Siete días*
2.	Cachaza 100%+ 0.5% N	Siete días
3.	Cachaza 75% + bagazo 25%	Siete días*
4.	Cachaza 70% + 20% paja + 10% ceniza	Siete días*
5.	Cachaza 60%+ 30% paja + 10% ceniza	Siete días

6.	Cachaza 100%	Catorce días*
7.	Cachaza 100%+ 0.5% N	Catorce días
8.	Cachaza 75% + bagazo 25%	Catorce días*
9.	Cachaza 70%+ 20% paja + 10% ceniza	Catorce días*
10.	Cachaza 60%+ 30% paja + 10% ceniza	Catorce días

3	10	1	7	2	5	9	6	4	8	5	6	9	8	7	10	3	7	2	4
1	7	8	5	4	3	6	9	2	10	8	2	10	7	1	4	5	3	9	6
1	2	7	5	8	10	3	6	4	9	8	4	9	7	1	5	10	3	2	6

Figura 2. Distribución de tratamientos al azar según su numeración en el sitio experimental. Cada número representa a una unidad experimental de un tratamiento (10 tratamientos con 6 repeticiones=60 unidades experimentales).

7.4. Manejo del proceso de composteo

Los tratamientos (Cuadro 1) se establecieron en un sitio con piso y techo de concreto sobre una película de plástico de 2x2 m (Figura 3), en la que se mezclaron los materiales para su homogenización (Figura 3a). Posteriormente, se cubrieron con el mismo nylon para protegerlo y evitar la lixiviación (Figura 3b) con su proceso de aereación cada 7 o 14 días.



Figura 3. a) Mezcla de los tratamientos y b) tratamientos tapados.

7.5. Variables de estudio

Control del proceso de composteo o madurez:

Se tomaron cuatro muestras de cachaza, bagazo, ceniza y paja para su caracterización física y química al inicio del proceso.

Las variables pH, MO, NH_4^+ , NO_3^- se analizaron con tres repeticiones cada una. Las muestras se colectaron cada 30 días en la parte media de las compostas (Figura 4). Se secaron a la sombra para el caso de las propiedades químicas (en el área de secado, en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco), además se molieron y se tamizaron en un tamiz con malla de 2 mm para su análisis según Pérez *et al.* (2011) y la NMX-FF-109-SCFI (2007). Lo cual genera 270 análisis.



Figura 4. Proceso de toma de muestras: a) toma de muestra y b) rotulación de la muestra enviada a laboratorio cada 30 días.

La temperatura (°C). Se registró semanalmente los días lunes, miércoles y viernes, de cada uno de los diez tratamientos. La lectura se realizó en la parte media de cada una de las compostas de cada tratamiento con tres repeticiones (Figura 5).



Figura 5. Detalles del proceso de toma de medición de la temperatura y pH en la parte media del tratamiento.

7.6. Análisis estadístico

Las variables de estudio fueron sometidos a un análisis de varianza en arreglo factorial 5 x 2, considerando los factores de Mezcla con 5 niveles (Cachaza 100%, Cachaza 100%+ 0.5% N, Cachaza 75% + bagazo 25%, Cachaza 70% + 20% paja + 10% ceniza y Cachaza 60%+ 30% paja + 10% ceniza) y tiempos de aireación con dos niveles (7 días y 14 días) con seis repeticiones. Para las variables con diferencias significancias entre los tratamientos, se realizó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) con el programa estadístico SAS 9.2.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Características físicas y químicas de la composta de cachaza

En el Cuadro 3, se presenta el análisis de varianza para las características físicas y químicas de las diferentes mezclas de composta y los tiempos de aireación en estudio. El pH no fue afectado por las diferentes mezclas y tiempos de aireación. El contenido de materia orgánica (MO, %) fue afectada significativamente por las diferentes mezclas de composta. Los nitratos (NO_3^- , ppm) no fueron afectados por las mezclas de composta y ni los tiempos de aireación. El amonio (NH_4^+ , ppm) presento efectos altamente significativos para el factor de mezclas de compostas.

Potencial hidrogeno (pH)

El pH mostro valores alcalinos para todos los tratamientos, sin mostrar diferencias significativas para los factores de mezcla, tiempos de aireación y su interacción (Cuadro 3). Dotaniya *et al.*, (2016) en un estudio mostraron que la presencia de cachaza carbonatada, modifica el pH con valores de arriba de 8 hasta 8.6 conforme aumenta la concentración de cachaza de 0.5 a 25 ton ha^{-1} , esto es debido a que contiene CaCO_3 , que es un alcalinizante. Se utiliza para corregir acidez en suelos ácidos.

El valor medio de pH de todos los tratamientos osciló desde 8.43 hasta 8.87. Según la norma mexicana NMX-FF-109-SCFI-2008 son valores dentro de lo óptimo (5-9 pH) para la calidad de las compostas. Estos resultados son similares a lo reportado por Torres-Lozada *et al.* (2021), en una composta a base de cachaza con un pH de 8.13. Martínez *et al.* (2021) evaluaron el pH de tres compostas obtenidas por la mezcla de residuos avícolas y cachaza de la industria azucarera encontrando valores de pH entre 7.3 a 7.70, valores inferiores a los resultados de este estudio.

Cuadro 3. Cuadrados medios del ANOVA de propiedades químicas de las diferentes mezclas de compostas y tiempos de aireación en estudio.

Factor de variación	GL	Cuadrados medios			
		pH	MO (%)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₄ ⁺ (mg/L)
Mezcla (M)	4	0.42 NS	52.83**	19.02 NS	584.22**
Tiempos (T)	1	1.4x10 ⁻³ NS	7.23 NS	0.20 NS	53.92 NS
M*T	4	0.11 NS	8.86 NS	129.45 NS	19.69 NS
Error	80	0.30	8.10	183.8	45.54
CV (%)		6.3	9.21	48.91	58.98

C= ciclo, V= variedad, SS= subunidad de suelo, SS>V= factor anidado (V dentro de SS), GL= grados de libertad, *=P<0.05, **=P<0.01, NS= no significativo.

Los valores de pH en los diferentes sustratos son considerados alcalinos y dentro de lo normal para sustratos orgánicos (Hernández *et al.*, 2013; Florida *et al.*, 2019). No obstante, cabe mencionar que los resultados difieren a lo reportado por Méndez *et al.* (2011), quienes realizaron la caracterización química de diferentes mezclas de bagazo y cachaza, y solo cachaza; encontrando que los valores de pH fluctuaron de 7.0 a 7.70, estos autores mencionan que la adición de amonio en las mezclas provocó una disminución del pH en los tratamientos con amonio y aquellos tratamientos sin amonio mantuvieron un pH constante con un valor de 7.70. Como fue el caso de la mezcla Cachaza 100% + 0.5 % N que presentó los valores más bajos de pH con 8.43 en contraste al tratamiento de Cachaza 100% en ambos niveles del factor tiempos de aereación (Figura 6). Hacia el final del proceso del compostaje, el pH desciende debido a la formación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular. Por otra parte, la norma oficial mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018, refiere que las compostas terminadas se encuentran en el intervalo de 6.7 a 8.5, lo cual parece ser el caso solo del tratamiento adicionado con amonio.

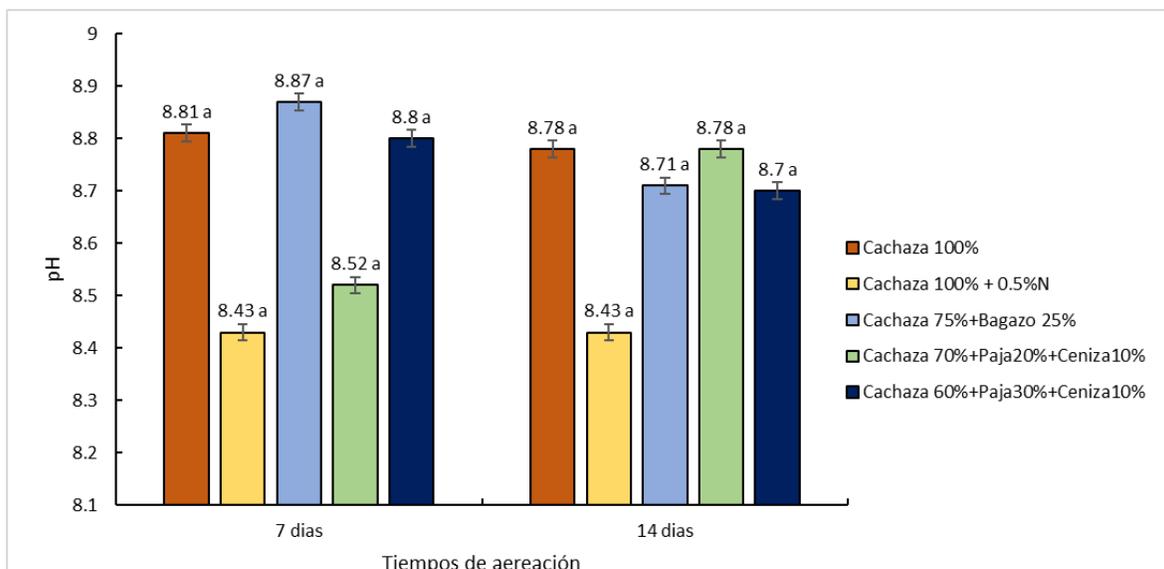


Figura 6. Comparación de medias de Tukey del potencial hidrogeno (pH) de las diferentes mezclas de compostas y tiempos de aireación en estudio. Medias con la misma literal son iguales estadísticamente.

Materia orgánica (MO, %)

El contenido de materia orgánica (MO, %) en las diferentes mezclas de composta varió de 28.03 a 33.89 % (Cuadro 3; Figura 7) valores que de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NMX-FF-109-SCFI-2008 se consideran dentro de lo óptimo (20 a 50% de MO). Estos resultados son similares a los valores del contenido de materia orgánica reportado para la elaboración de sustratos orgánicos de cachaza de Martínez *et al.* (2021) y más bajos que los reportados por Hernández-Melchor *et al.* (2008) en la composta a base de cachaza con valor de 58.6% de MO.

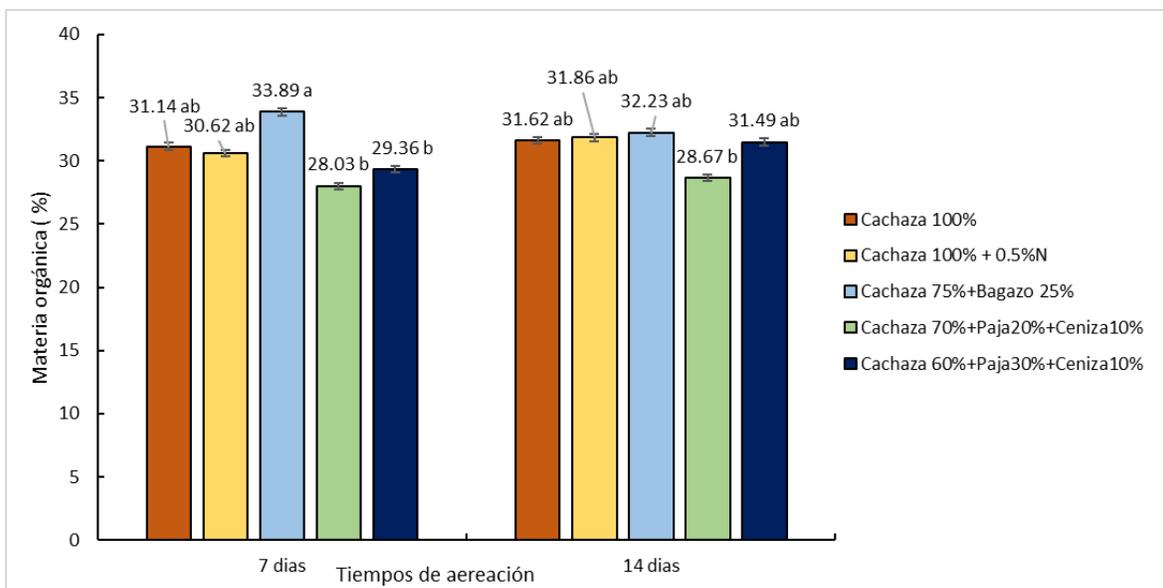


Figura 7. Comparación de medias de Tukey del contenido de materia orgánica (MO, %) de las diferentes mezclas de compostas y tiempos de aireación en estudio. Medias con la misma literal son iguales estadísticamente.

En la Figura 7, se visualiza que el tratamiento de Cachaza 75% + Bagazo 25% a los 7 días de aireación fue el que presentó los mayores valores de MO (33.89 %) en comparación a los demás tratamientos. Esto se explica debido a que el bagazo contiene compuestos orgánicos tales como celulosa, hemicelulosa y lignina (Méndez *et al.*, 2011; Salgado *et al.*, 2013) en proporciones del 47–52, 25–28 y 20–21 %, respectivamente (Dotaniya *et al.*, 2016).

Nitratos (NO_3^- , ppm)

Los NO_3^- no presentaron diferencias significativas para los factores de mezcla y tiempos de aireación y su interacción (Cuadro 3). Los valores de NO_3^- observados fluctuaron de 5 a 13.15 ppm (Figura 9). Los valores encontrados en este estudio indican según los criterios de CCQC (2001), que valores <100 ppm pertenecen a compostas muy maduras.

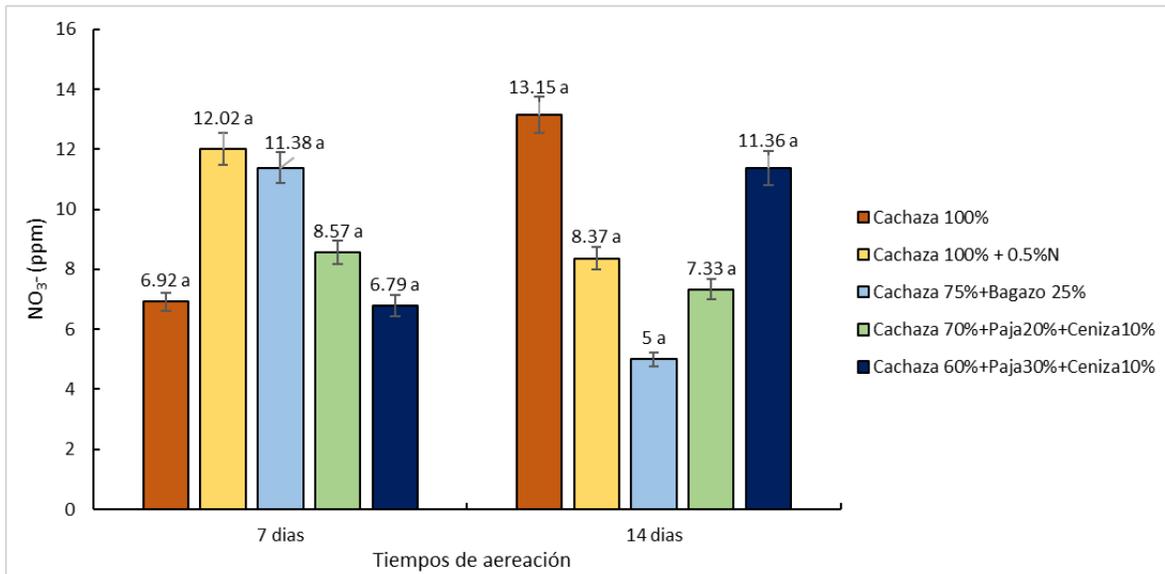


Figura 8. Comparación de medias de Tukey de nitratos (NO_3^- , ppm) de las diferentes mezclas de compostas y tiempos de aireación en estudio (medias con la misma literal son iguales estadísticamente).

En la Figura 9, se muestra los resultados de las pruebas de media de Tukey, se observa una gran fluctuación del NO_3^- a pesar de que no hubo diferencia significativa entre las medias, además que el tratamiento adicionado con amonio en el nivel de 14 días de tiempos de aireación presento los valores más bajos de NO_3^- con 5 ppm. En este sentido, al incrementar el bagazo de caña en el sustrato, el contenido de NO_3^- se redujo, mientras que en los tratamientos con mayor proporción de cachaza el contenido aumentó (Méndez *et al.*, 2011). Los resultados anteriores se han explicado porque durante las etapas iniciales del compostaje, la formación de nitrato (NO_3^-) es casi nulo, solo hasta que el sustrato ha superado la fase termofílica y adquiere un rango mesofílico hay una liberación de NO_3^- , debido a que entonces es cuando aparecen los organismos que transforman el NH_4 a NO_3^- (Montoya-Jasso *et al.*, 2021), de lo cual se infiere que los cambios ocurridos durante la fase termofílica, como son la disminución del pH e incremento de la CE, favorecen el aumento del N-amoniaco y nitratos (Méndez *et al.*, 2011), como fue el caso de los tratamientos adicionados con amonio donde se registraron los menores valores de pH (Figura 6).

Amonio (NH₄⁺, ppm)

El amonio NH₄⁺ presentó diferencias significativas solamente en el factor mezcla (Cuadro 3; Figura 10). De acuerdo a los criterios establecidos por CCQC (2001), la concentración de NH₄⁺ de una composta, según su grado de madurez, es >500 ppm en una composta inmadura, entre 100-500 ppm en una composta madura, y en una composta muy madura es <100 ppm. Los resultados señalan que la adición de amonio en los tratamientos de Cachaza 100% + 0.5 % N en ambos tiempos de aireación, se tradujo en mayores niveles de amonio (Figura 9), dado que esos tratamientos fueron los que presentaron los mayores valores de NH₄⁺ en comparación a los tratamientos sin adición de amonio (Méndez *et al.*, 2011; Torres-Lozada *et al.*, 2021).

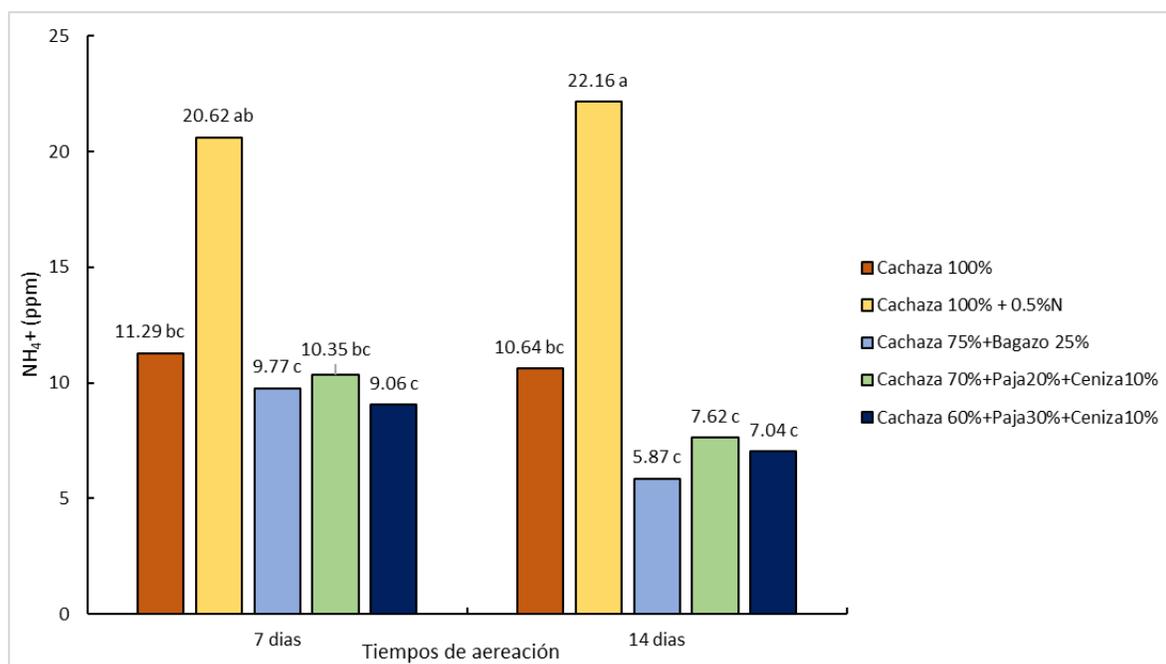


Figura 9. Comparación de medias de Tukey de amonio (NH₄⁺, ppm) de las diferentes mezclas de compostas y tiempos de aireación en estudio (medias con la misma literal son iguales estadísticamente).

Las compostas de este estudio se clasifican como materiales orgánicos estabilizados muy maduros (CCQC, 2001). Por otra parte, es evidente que el contenido menor de NH₄⁺ registrado en la mezcla con bagazo fue debido a la

transformación del amonio y la lenta degradación de residuos con alta relación C/N como el bagazo de caña (Méndez *et al.*, 2011; Salgado *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2021). La mezcla de cachaza y bagazo de caña con 90 días de compostaje presentó una relación carbono-nitrógeno (C/N) estable, así como una baja cantidad de nitrógeno amoniacal (NH₄), lo cual permite que exista una cantidad de nitratos disponibles para la planta (Quiroz y Pérez, 2013), como fue el caso del tratamiento Cachaza 75% + Bagazo 25 % a los 7 días de tiempo de aireación (Figura 9).

8.2. Monitoreo del proceso de composteo

En la Figura 10, se presenta el registro de las temperaturas de la parte central de cada tratamiento del composteo a base de cachaza. Se puede observar que a los 4 días del proceso de maduración se registró las mayores temperaturas promedio en todas las mezclas de compostas, siendo que la fase termófila paso en este periodo.

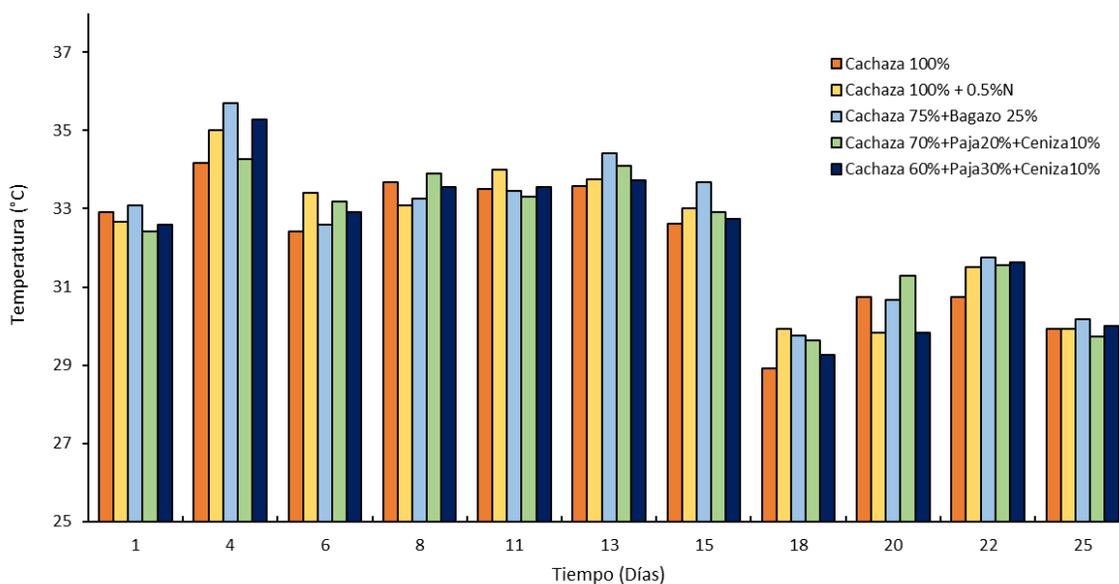


Figura 10. Registro de la temperatura durante el proceso del composteo a base de cachaza de las diferentes mezclas de compostas en estudio.

En la Figura 11, se presenta la variación de pH de las diferentes mezclas de compostas. Se visualiza que a los 4 días desciende los valores de pH en todos los

tratamientos en estudio, lo cual coincide con el mayor aumento de temperatura. El periodo de menor pH se registró hasta los 15 días en el proceso de composteo para aumentar hasta los 25 días. No obstante, a los 18 días del proceso de composteo se registró una caída en la temperatura en las compostas, momento en que el pH comenzó a aumentar nuevamente hasta los 25 días (Fase de enfriamiento y maduración durante el proceso de compostaje).

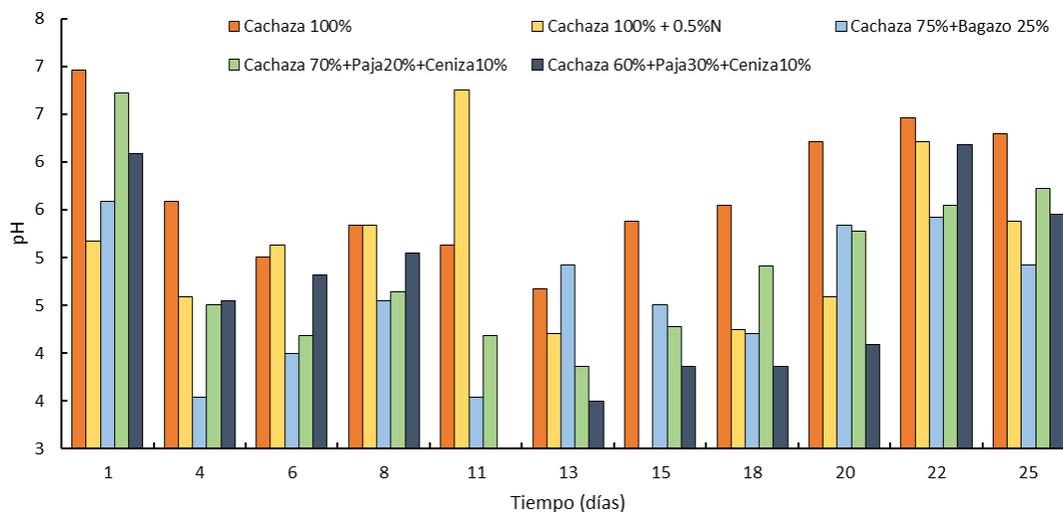


Figura 11. Registro del pH durante el proceso del composteo a base de cachaza de las diferentes mezclas de compostas en estudio.

Los tratamientos a base de cachaza alcanzaron la fase mesófila en menor tiempo (entre 1 y 4 días), lo que demuestra el efecto sinérgico de la incorporación de cachaza en las mezclas. A los 11 días, el tratamiento de Cachaza + 0.5 N alcanzó la fase termófila, durante esta fase se presentan microorganismos que actúan transformando el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH del medio sube y periodo donde se registró el segundo pico de temperatura más alta en este tratamiento (Moreno-Escandón *et al.*, 2022). Entre los 11 y 13 días, todos los tratamientos alcanzan los menores valores de pH durante el proceso de composteo, siendo indicador de la terminación de la fase mesófila junto con el segundo pico de temperaturas más altas. El tiempo para alcanzar temperaturas termófilas coincide con los resultados de autores como Ogunwande *et al.* (2008) y Bryndum *et al.* (2017), quienes concluyeron que la alta proporción de compuestos fácilmente degradables favorece el metabolismo de diferentes grupos tróficos que aumentan

las velocidades de reacción y consecuentemente la generación de calor en el interior de la pila. Al disminuir las temperaturas a los 18 días, se reactiva la actividad microbiana, lo cual se caracteriza por un aumento del pH en todas las mezclas de composta (Martínez *et al.*, 2021) y que coincide con los valores alcalinos reportados en los análisis químicos de las compostas.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las diferentes mezclas a base de residuos industriales de la caña de azúcar afectaron las características físicas y químicas de las compostas.

Se observaron diferencias significativas en el contenido de NH_4 entre los tratamientos, teniendo los valores más altos, aquellos tratamientos en que se suministró este compuesto de forma química.

También se observaron diferencias significativas en materia orgánica; los tratamientos que presentaron un mayor contenido de materia orgánica fueron aquellos en los que la cachaza estuvo incluido como componente.

Los diferentes tiempos de aereación no mostraron efectos significativos sobre parámetros de calidad en compostas.

La temperatura y el pH, presentaron un comportamiento adecuado donde se presentaron subidas de temperaturas que coincidieron con una disminución del pH y cuando descendió la temperatura el pH del medio aumento. Se acepta la primera hipótesis específica.

Todos los tratamientos presentaron óptimos niveles de pH y MO. Los tratamientos de Cachaza 100% y, Cachaza 100% + 0.5 % de N se consideraron como los mejores por presentar altos valores de nitratos (NO_3^-) con 13.12 y 12.02 ppm, respectivamente; y altos contenidos de amonio (NH_4^+) con valores de 22.16 y 11.29 ppm. Todas las mezclas se consideraron compostas maduras y aptas para sustituir a la fertilización química. Se acepta la segunda hipótesis específica.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca otorgada a la autora. A la memoria del Dr. Sergio Salgado García, que en paz descanse; quien inicio esta investigación como profesor consejero de la primera autora.

X. LITERATURA CITADA

- Ansorena Miner, J. 2016. El compost de biorresiduos. Normativa, calidad y aplicaciones. Ediciones Paraninfo, SA.
- Ansorena, J., Batalla, E., y Merino, D. 2014. Evaluación de la calidad y usos del compost como componente de sustratos, enmiendas y abonos orgánicos. Escuela Agraria Fraisoro. Desde: https://cdn.blueberriesconsulting.com/2015/07/pdf_000304.pdf
- Armida-Alcudia, L., Espinosa-Victoria, D., Palma-López, D. J., Galvis-Spinola, A., & Salgado-García, S. (2005). Carbono en biomasa microbiana y carbono soluble como indicadores de calidad de vertisoles cultivados con caña azucarera. *Terra Latinoamericana*, 23(4), 545-551.
- Arreola-Enríquez, J., Palma López, D.J., Salgado-García, S., Camacho-Chiu, W., Obrador-Olán, J.J., Juárez-López, J.F. y Pastrana-Aponte, L. 2004. Evaluación de abono órgano-mineral de cachaza en la producción y calidad de la Caña de Azúcar. *Terra Latinoamericana*. 22(3): 351-357.
- Arteaga, L. C. 1997. Bacterias fijadoras de nitrógeno de la rizosfera, caulosfera y filosfera de la caña de azúcar. Tesis de maestría. Edo. de México: IRENAT-Colegio de Postgraduados. Montecillos Texcoco, Estado de México.
- Bryndum, S., Muschler, R., Nigussie, A., Magid, J., y de Neergaard, A. 2017. Reduced turning frequency and delayed poultry manure addition reduces N loss from sugarcane compost. *Waste Management* 65: 169-177.
- Callizaya Estrada, D. Elaboración de compost acelerado utilizando cuatro activadores en la localidad de Carabuco (Doctoral dissertation). Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/23075/T-2685.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- CCQC. 2001. Compost Maturity Index. California Compost Quality Council. Nevada City, CA, EEUU. 26 pp
- CONADESUCA, 2019. Rendimiento durante la zafra 2018-2019, donde el ingenio Cia La Fe Pujiltic molió 1,551 toneladas de caña de azúcar. Recuperado de: <http://caneros.org.mx/>
- Córdova, G.G., Salgado, G.S., Castelán, E.M., Palma, L.D.J., García, M.E., Lagunés E.LC. y Córdova, S.S. 2016. Opciones de fertilización para el cultivo de caña de azúcar en Tabasco, México. *Agroproductividad*. 9(3): 27-34.
- Cuellar AI, Villegas DR, León OM, Pérez IH (2002). Manual de Fertilización de la Caña de Azúcar en Cuba. Publica. La Habana, Cuba. pp. 88-92.
- Danya JF (2000) Nitrate retention and leaching in variable charge soils of a watershed in Sao Paulo State. Brazil. *Soil Sci. Plant Anal.* 31: 777-791.
- Domínguez-Gamas, M. I., Palma-López, D. J., Salgado-García, S., JJ, O. O., & Ruíz-Rosado, O. (2018). Evaluation of Organic Substrates For The Production Of Sugarcane Plantlets. *Agroproductividad*, 11(12).
- Dotaniya, M. L., Datta, S. C., Biswas, D. R., Dotaniya, C. K., Meena, B. L., Rajendiran, S., Regar, K.L y Lata, M. (2016). Use of sugarcane industrial by-products for improving sugarcane productivity and soil health. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 5(3), 185-194.
- Estrada-Bonilla, G. A., Lopes, C. M., Durrer, A., Alves, P. R., Passaglia, N., & Cardoso, E. J. (2017). Effect of phosphate-solubilizing bacteria on phosphorus dynamics and the bacterial community during composting of sugarcane industry waste. *Systematic and Applied Microbiology*, 40(5), 308-313.
- Florida, N., Reátegui, F., y Pocomucha, V. 2019. Caracterización del Compost a base de plumas de pollos (*Gallus gallus domesticus*) y otros insumos. *Livestock Research for Rural Development* 6(2): 1-5.
- García-Torres, R., Ríos Leal, E., Martínez Toledo, A., Ramos Morales, F. R., Cruz Sánchez, J. S., y Cuevas Díaz, M. D. C. 2011. Uso de cachaza y bagazo de

- caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado. *Revista internacional de contaminación ambiental* 27(1): 31-39.
- Gong, CM. 2007. Microbial safety control of compost material with cow dung by heat treatment. *Journal of Environmental Sciences*. 19(8): 1014-9.
- Gupta N, Tripathi S, Balomajumder C (2011) Characterization of press mud: a sugar industry waste. *Fuel* 90(1):389–394.
- Hernández-Melchor, G. I.; Salgado, G. S.; Palma, L. D.; Lagunes, E. L. C.; Castelán, E. M. y Ruíz, R. O. 2008. Vinaza y composta de chachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un gleysol mólico de Chiapas México. *Interciencia* 33:855-860.
- Hernández, R.O., Hernández, T.A., Rivera, F.C., Arras, V.A., Ojeda, B.D. 2013. Calidad nutrimental de cuatro abonos orgánicos producidos a partir de residuos vegetales y pecuarios. *Terra Latinoamericana* 31: 35-46. www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n1/2395-8030-tl-31-01-00035.pdf
- Manyi-Loh, C. E., Mamphweli, S. N., Meyer, E. L., Makaka, G., Simon, M., & Okoh, A. I. (2016). An overview of the control of bacterial pathogens in cattle manure. *International journal of environmental research and public health*, 13(9), 843.
- Martínez, V. R., Lagunes, D. A. R., Hernández, R. C. L., Ramos, N. M., Contreras, J. O. R., & Castro, O. C. 2021. Evaluación fisico-química de composta de residuos avícolas y cachaza. *Agrociencia* 55(4): 291-302.
- Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T. H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J., y Boldrin, A. 2013. Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. *Agronomy for sustainable development*, 33(4): 721-732.
- Méndez, M. A. P., Hernández, R. S., Palma-López, D. J., y Salgado, G. S. 2011. Caracterización química del compostaje de residuos de caña de azúcar en el sureste de México. *Interciencia* 36(1): 45-52.

- Montoya-Jasso, V. M., Ordaz-Chaparro, V. M., Benedicto-Valdés, G. S., Ruiz-Bello, A., & Arreola-Tostado, J. M. (2021). Caracterización química y física de sustratos enriquecidos con minerales y composta. *Terra Latinoamericana*, 39.
- Moreno-Escandón, L., Perea-Soto, D., Soto-Paz, J., Torres-Lozada, P., y Marmolejo-Rebellón, L. F. 2022. Mejora del compostaje de biorresiduos mediante la incorporación de cachaza como material de enmienda. *Ingeniería y Universidad* 26.5
- NMX-FF-109-SCFI-2007. Humus de lombriz (lombricomposta) -Especificaciones y métodos de prueba. SEMARNAT. México. 24 p.
- NMX-AA-180-SCFI-2018. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (2018). Que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos fi. *Diario Oficial de La Federación*
- Ogunwande, G. A., Osunade, J. A., Adekalu, K. O., y Ogunjimi, L. A. O. 2008. Nitrogen loss in chicken litter compost as affected by carbon to nitrogen ratio and turning frequency. *Bioresource Technology* 99(16): 7495-7503.
- Palma-López, D. J., Castillo-Salas, J. M., Salgado-García, S., Ortiz-Ceballos, Á. I., y Aceves-Navarro, E. 2016a. Caracterización química de abonos orgánicos enriquecido con guano de murcielago. *Agroproductividad* 9(12): 10-16.
- Palma-López, D. J., Zavala-Cruz, J., Cámara-Reyna, J. C., Ruiz-Maldonado, E., y Salgado-García, S. 2016b. Use of the sugar cane (*Saccharum spp.*) agroindustries residues to elaborate organic fertilizers. *Agroproductividad* 9(7): 29-34.
- Palma-López, D. J., Morales-Garduza, M. A., Rivera-Hernández, B., Palma-Cancino, D. Y., y Peña-Peña, A. J. 2017. Produccion de hortalizas en sistema organoponico. *Agroproductividad* 10(7): 94-100.

- Pérez, M., Sánchez, R., Palma, D.J. y Salgado, G.S. 2011. Caracterización química del compostaje de los residuos de la caña de azúcar en el sureste de México. *Interciencia*. 36(1): 45-52.
- Planalsucar, 1983. Nutricao e edubacao de cana de acuzar no Brasil. Colección no. 2 369p.
- Quiroz, G.I. y Pérez, V.A. 2013. Vinaza y compost de cachaza: efecto en la calidad del suelo cultivado con caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Pub. Esp.* (5): 1069-1075.
- Quiñones, Y. P. A., Nieto, A. M. H., & Baquero, C. A. H. (2019). Caracterización de lixiviados generados del raquis de plátano (*Musaceae paradisiaca* L). *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 10(1), 18-47.
- Román, P., Martínez, M. M., y Pantoja, A. 2013. Manual de compostaje del agricultorexperiencias en américa latina. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Desde: <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>
- Salgado, G.S., Castelán, E.M., Aranda, I.E.M., Ortiz, G.C.F., Ortiz, L.H., Lagunés, E.L.C., Mendoza, H.J.R.H. y Córdova, S.S. 2014. Validación de dosis generadas por el sistema de fertilización SIRDF para caña de azúcar (*Sacharum officinarum* L). *Agroproductividad*. 7(2): 47-54.
- Salgado, G.S., Lagunés, E.L.C., Núñez, E.R., Ortiz, G.C.F., Bucio, A.L., y Aranda I.E.M. 2013. CAÑA DE AZUCAR: Producción sustentable. BBA, Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa. México, D.F. 520 p.
- Salgado, G.S., Núñez, E.R. y Bucio, A.L. 2004. Determinación de la dosis óptima económica de fertilización en caña de azúcar. *TERRA*. 21(2): 267-272.
- Sánchez-Hernández, R., Ordaz Chaparro, V. M., Benedicto Valdés, G. S., Hidalgo .Moreno, C. I., y Palma López, D. J. 2005. Cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso por aportes de lombricompost de cachaza y estiércol. *Interciencia* 30(12): 775-779.

- Sánchez-Hernández, R., Ordaz-Chaparro, V. M., Benedicto-Valdés, G. S., Hidalgo-Moreno, C. I., y Palma-López, D. J. 2006. Regeneración estructural de un suelo arcilloso por aportes de vermicompost en la Chontalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia* 22(1): 13-26.
- Steel, R. G. 1985. *Bioestadística Principios y procedimientos*. Bogota, Colombia: McGRAW-HILL.
- Torres-Lozada, L. K., Escobar-Medina, D., Soto-Paz, J., Daza-Torres, M. C., y Torres-Lozada, P. 2021. Evaluación de la mineralización del nitrógeno en un suelo ácido bajo fertilización inorgánica y orgánica. *Ingeniería* 26(2): 197-212.
- Triano-Sánchez, A., Palma-López, D. J., Salgado-García, S., Lagunes-Espinoza, L. C., y Avalos, V. C. 2016. Nutrición orgánica en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao L.*) en Tabasco, México. *Agroproductividad* 9(12): 39-45.
- Trujillo-Narcía, A., Rivera-Cruz, M., del Carmen Lagunes-Espinoza, L., Palma-López, D. J., Sánchez-Soto, S., y Ramírez-Valverde, G. 2014. Uso de fertilizantes orgánicos en la enmendación de un fluvisol restaurado tras la contaminación con petróleo. *Interciencia* 39(4): 266-273.
- Váldez B. A., Guerrero P.A., García-López E. y Obrador O.J.J.. 2009. *Manual para el cultivo y producción de la caña de azúcar*. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas Tabasco. México, 1-3 pp.
- VLACO. 2006. *Composting and Quality Assurance. Experience and Considerations from VLACO*.
- Wichuk, K. M., & McCartney, D. (2010). Compost stability and maturity evaluation—a literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(11), 1505-1523.