

2024

Pretratamiento físico-biológico de residuos orgánicos
agroindustriales para mejorar su biotransformación mediante
larva de mosca soldado negro

Quilaztli Carolina
Escobar Montoya



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Pretratamiento físico-biológico de residuos orgánicos
agroindustriales para mejorar su biotransformación
mediante larva de mosca soldado negro

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería en Biosistemas

Presenta

Lic. Quilaztli Carolina Escobar Montoya

Dirigido por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Querétaro, 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

 **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.

 **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

 **SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería en Biosistemas

**PRETRATAMIENTO FÍSICO-BIOLÓGICO DE RESIDUOS ORGÁNICOS
AGROINDUSTRIALES PARA MEJORAR SU BIOTRANSFORMACIÓN
MEDIANTE LARVA DE MOSCA SOLDADO NEGRO**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería en Biosistemas

Presenta:
Quilaztli Carolina Escobar Montoya

Dirigido por:
Juan Fernando García Trejo

Dr. Juan Fernando García Trejo

Presidente

Firma

Dra. Ana Angelica Feregrino Pérez

Secretario

Firma

Dr. Humberto Aguirre Becerra

Vocal

Firma

M. en C. Benito Parra Pacheco

Suplente

Firma

M. en C. María Isabel Nieto Ramírez

Suplente

Firma

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Marzo del 2024

DEDICATORIAS

Para mi familia, especialmente a mis padres, a mis hermanas, a mi Velita y a mi tía Ami, gracias por todo el amor y el apoyo, y por siempre ser mi mayor inspiración. Y gracias por aguantar el olor a mosca durante estos años. A Isabellita por ser una chispita que me trajo luz en los momentos más difíciles.

A Saúl, gracias por siempre estar incondicionalmente, este camino no habría sido lo mismo sin ti, gracias por el apoyo, las críticas, los consejos y los momentos felices.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCyT por el apoyo económico para esta investigación.

Al todo el laboratorio de Bioingeniería, gracias por brindarme su apoyo y conocimiento para llevar a cabo esta investigación.

Gracias a mis compañeros de maestría, Saúl, Susi, Said y Nacho, por su amistad y disposición a revisar y hacer sugerencias una y otra vez, y por volver estos dos años más amenos.

ÍNDICE

DEDICATORIAS	2
AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN	12
II. ANTECEDENTES	15
2.1 Residuos orgánicos agroindustriales	15
2.2 Aprovechamiento de residuos orgánicos	15
2.3 Mosca soldado negro	17
2.4 Biotransformación	19
2.5 Pretratamiento de residuos	21
2.5.2 <i>Pretratamiento físico</i>	21
2.5.3 <i>Pretratamiento biológico</i>	24
III. HIPÓTESIS	28
IV. OBJETIVOS	28
4.1 Objetivo General	28
4.2 Objetivos particulares	28
V. METODOLOGÍA	29
5.1 Determinación de la dosis de alimentación adecuada para las larvas de cada residuo orgánico	29
5.1.1 <i>Obtención de residuos orgánicos</i>	29
5.1.2 <i>Obtención de la larva</i>	31
5.1.3 <i>Prueba de dosis alimenticia</i>	31
5.1.4 <i>Determinación de conversión alimenticia, reducción de sustrato y mortalidad</i>	33

5.2 Determinación del efecto de los pretratamientos sobre los diferentes residuos orgánicos	34
5.2.1 <i>Diseño experimental</i>	34
5.2.2 <i>Pretratamiento físico</i>	37
5.2.3 <i>Pretratamiento biológico</i>	37
5.2.4 <i>Determinaciones fisicoquímicas antes y después del pretratamiento</i>	38
5.3 Determinación del efecto del pretratamiento en la biotransformación de residuos orgánicos en larva de mosca soldado negro	39
5.3.1 <i>Alimentación de las larvas con residuos orgánicos pretratados</i>	39
5.3.2 <i>Determinación de conversión alimenticia, reducción de residuos y mortalidad</i>	39
5.4 Análisis estadístico	39
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
6.1 Determinación de la dosis de alimentación adecuada para las larvas de cada residuo orgánico	40
6.1.1 <i>Curvas de ganancia de peso</i>	40
6.1.2 <i>Ánalisis de variables productivas</i>	44
6.2 Determinación del efecto de los pretratamientos sobre los diferentes residuos orgánicos	46
6.2.1 <i>Humedad, tamaño de partícula y pH de los residuos</i>	46
6.2.2 <i>Composición bromatológica de los residuos</i>	47
6.3 Determinación del efecto del pretratamiento en la biotransformación de residuos orgánicos en larva de mosca soldado negro	49
6.3.1 <i>Curvas de ganancia de peso</i>	49
6.3.2 <i>Ánalisis de variables productivas de la larva</i>	52
7 CONCLUSIONES	60
8 REFERENCIAS	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Biotransformación de distintos residuos orgánicos mediante larva de mosca soldado negro.....	20
Tabla 2. Análisis de variables productivas de la larva por dosis para cada residuo orgánico.....	45
Tabla 3. Caracterización de los residuos orgánicos antes y después de los pretratamientos de larva de MSN.....	46
Tabla 4. Análisis bromatológico de los residuos orgánicos.....	48
Tabla 5. Variables productivas de la alimentación de las larvas con diferentes residuos orgánicos pretratados	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de vida de <i>Hermetia illucens</i>	17
Figura 2. Diagrama de etapas del trabajo de investigación.....	28
Figura 3. Residuos de mango manila (izquierda), separación de pulpa, cáscara y semilla del mango (derecha).....	29
Figura 4. Residuo de bagazo de cerveza.....	29
Figura 5. Residuo de tilapia.....	29
Figura 6. Larvas de mosca soldado negro de 5 DOL.....	30
Figura 7. Contenedores de plástico con residuo de pulpa de mango, cáscara y semilla de mango, y dieta Gainesville.....	31
Figura 8. Contenedores de plástico con residuo de tilapia y cerveza....	31
Figura 9. Colocación de contenedores experimentales en incubadora a 28°C.....	32
Figura 10. Diseño experimental para el residuo de mango.....	34
Figura 11. Diseño experimental para el residuo de tilapia.....	35
Figura 12. Diseño experimental para el residuo de bagazo de cerveza.....	35
Figura 13. Cubeta acondicionada con airlock para la fermentación de residuos.....	36
Figura 14. Curvas de ganancia de peso larvario a lo largo del tiempo de	

alimentación con residuo de mango completo, con tres dosis de alimentación	40
Figura 15. Curvas de ganancia de peso larvario a lo largo del tiempo de alimentación con residuo de semilla y cáscara de mango, con tres dosis de alimentación.....	41
Figura 16. Curvas de ganancia de peso larvario a lo largo del tiempo de alimentación con residuo de pulpa de mango y bagazo de cerveza con tres dosis de alimentación.....	42
Figura 17. Curva de ganancia a lo largo del tiempo de alimentación con residuo de tilapia con tres dosis de alimentación.....	43
Figura 18. Curva de ganancia de peso con residuo de pulpa de mango, con diferentes tratamientos.....	49
Figura 19. Curva de ganancia de peso con residuo de mango completo y semilla y cáscara de mango, con diferentes tratamientos.....	50
Figura 20. Curva de ganancia de peso con residuo de bagazo de cerveza con diferentes tratamientos.....	51
Figura 21. Curva de ganancia de peso con residuo de tilapia con diferentes tratamientos.....	52
Figura 22. Prueba HDS de Tukey-Kramer realizada en software JMP 13.2. para peso máximo de larva obtenido de los diferentes pretratamientos para residuos de mango.....	53
Figura 23. Prueba HDS de Tukey-Kramer realizada en software JMP 13.2. para peso máximo de larva obtenido de los diferentes pretratamientos para residuos de bagazo de cerveza y tilapia.....	54

Figura 24. Prueba HDS de Tukey-Kramer realizada en software JMP 13.2. (A) Residuos enteros, (B) Residuos molidos, (C) Residuos fermentados.....	56
Figura 25. Ganancia de peso de las larvas comparando los diferentes residuos por tratamiento	57

RESUMEN

En los últimos años ha aumentado la generación de residuos orgánicos. Por lo anterior, se han buscado métodos de aprovechamiento que disminuyan su efecto en el ambiente. Una de estas opciones es la biotransformación de residuos orgánicos mediante larva de mosca soldado negro. Diversos estudios han demostrado la capacidad de la larva para consumir una gran variedad de residuos, sin embargo, estos tienen una gran variabilidad de características físicas y químicas que repercuten en su consumo, teniendo un efecto en el crecimiento y desarrollo. Por lo que, se ha sugerido la aplicación de pretratamientos en los residuos para mejorar su consumo por la larva. Es por esto, que en este trabajo se buscó determinar el efecto del pretratamiento físico-biológico (molido y fermentación) de diferentes residuos orgánicos (mango completo, pulpa de mango, semilla y cáscara de mango, bagazo de cerveza, y tilapia) sobre su biotransformación mediante larva de mosca soldado negro. Se encontró que hay una mayor ganancia de peso a mayor dosis de alimentación, pero sucede lo contrario con la conversión alimenticia, excepto en el residuo de tilapia. Se observó que el pretratamiento de molido no aumentó la ganancia de peso de la larva ni la conversión alimenticia, sin embargo, sí aumentó la reducción del sustrato en los residuos de semilla y cáscara de mango y tilapia. El pretratamiento de fermentado solo mostró un aumento de la conversión alimenticia en residuo de semilla y cáscara de mango. El residuo que obtuvo mayor conversión alimenticia fue la tilapia entera, en conjunto con el mayor peso de larva, mas, tuvo también la mortalidad más alta de todos los tratamientos. El siguiente residuo con mejor conversión alimenticia y mayor peso de larva fue el bagazo de cerveza entero y molido.

Palabras claves:

Residuos orgánicos agroindustriales, biotransformación, mosca soldado negro

ABSTRACT

In recent years, the generation of organic waste has increased. For this reason, treatment methods have been sought to reduce its effect on the environment. One of these options is the biotransformation of organic waste using black soldier fly larvae. Several studies have demonstrated the larva's capacity to consume a great variety of wastes; however, these have a great variability of physical and chemical characteristics that affect their consumption, influencing their growth and development. Therefore, it has been suggested the application of waste pretreatments to improve their consumption by the larvae. Therefore, in this work we sought to determine the effect of physical-biological pretreatment (grinding and fermentation) of different organic wastes (whole mango, mango pulp, mango seed and peel, brewery waste, and tilapia) on their biotransformation by black soldier fly larvae. It was found that there is a higher weight gain at higher feeding doses, but the opposite is true for feed conversion, except for the tilapia residue. It was found that the grinding pretreatment did not increase larval weight gain or feed conversion, however, it did increase substrate reduction in mango and tilapia seed and peel residues. The fermentation pretreatment only showed an increase in feed conversion in seed and mango peel residues. The waste with the highest feed conversion was whole tilapia, together with the highest larval weight, but it also had the highest mortality of all treatments. The next residue with the best feed conversion and highest larval weight was whole and ground brewery waste.

Keywords:

Agroindustrial organic waste, biotransformation, black soldier fly

I. INTRODUCCIÓN

El continuo incremento poblacional causa un aumento en la demanda de producción de alimentos, lo que ha provocado la generación de una mayor cantidad de residuos orgánicos. Tan solo en 2020, se produjeron 2.24 mil millones de toneladas de residuos sólidos, y se espera que para el 2050 aumente a 3.88 mil millones de toneladas (The World Bank, 2022), de las cuales el 44% se compone de desperdicios de comida y otros residuos biológicos (Kaza et al., 2018). En 2020, en México se reportó una producción agrícola de 263 millones de toneladas, y una producción pecuaria de 23 millones de toneladas (SADER, 2021). Se estima que se desperdicia el 37% de los alimentos producidos en el país, esto equivaldría a 97 millones de toneladas de residuos agrícolas, y 8 millones de toneladas de residuos pecuarios (CEDRSSA, 2020).

En México, el 93% de los residuos son dispuestos en rellenos sanitarios o en incineradores (CCA, 2017), lo cual tiene repercusiones ambientales, económicas, y para la salud (Chen et al., 2020). El impacto ambiental negativo se deriva de su descomposición, que produce gases de efecto invernadero (principalmente CO₂ y metano), y lixiviados que al filtrarse contaminan suelos y cuerpos de agua (Maina et al., 2017). Económicamente también representan un problema, debido a la enorme cantidad de recursos invertidos en la producción de esta materia, así como en la recolecta y transporte de estos a su disposición final, además, de la extensión de tierra necesaria para su almacenamiento (FAO, 2011). Por otra parte, al no ser manejados adecuadamente funcionan como criadero de vectores de enfermedades como roedores, cucarachas, mosquitos, etc. (The World Bank, 2022).

Por lo anterior, se ha optado por la búsqueda alternativas que mitiguen el

impacto de los residuos orgánicos, a través de su aprovechamiento para la generación de valor. Una de estas es la biotransformación de residuos mediante la larva de mosca soldado negro (*Hermetia illucens*) (Surendra et al., 2020). Esta ha destacado por su alta capacidad de biotransformación de residuos orgánicos a productos de valor comercial como proteína, grasa, quitina, y frass (El-Hack et al., 2020). Especialmente, la larva muestra potencial en la industria de alimentación animal para reemplazar fuentes de proteína como la harina de pescado y de soya, siendo su producción más sostenible dada su alta tasa de reproducción, ciclo de vida corto, menor requerimiento de espacio y cantidad de agua (Wang et al., 2017). A partir del procesamiento de 10 toneladas de residuos se pueden producir 300 kg de larva seca, con un uso de suelo de 6.61 m², mientras que para producir la misma cantidad de soya se necesitan casi 1000 m² (Langemeier, 2021).

Actualmente, la larva de mosca soldado negro es utilizada para el aprovechamiento de residuos orgánicos (Surendra et al., 2020). La larva puede alimentarse de una gran variedad de residuos orgánicos como frutas y vegetales, estiércol de ganado, residuos agrícolas, vísceras de pescado, residuos cárnicos, entre otros (Lalander et al., 2019). Sin embargo, estos tienen una alta variabilidad en cuanto a características físicas y químicas, debido a su naturaleza y procesamiento (Jördenin et al., 2005). Esta variabilidad tiene implicaciones en el crecimiento, desarrollo y calidad de la larva, por esta razón, se ha sugerido la aplicación de pretratamientos a los residuos orgánicos para modificar el tamaño de partícula, la humedad, y disponibilidad de nutrientes (Law et al., 2018). Los residuos al presentar características físicas homogéneas podrían mejorar su consumo por parte de la larva propiciando transformaciones más rápidas, eficientes y de menor costo (Law et al., 2018). Por lo que, la estandarización de métodos de pretratamiento para distintos tipos de residuos podría aumentar su biotransformación.

En este trabajo se aplicaron pretratamientos físicos de y trituración, y un pretratamiento biológico de pre-digestión, a residuos de mango, bagazo de cerveza y tilapia. Después de los pretratamientos los residuos fueron proporcionados a las larvas para su alimentación, durante la cual fue monitoreada la ganancia de peso, para posteriormente realizar una curva de ganancia de peso. Después, se cosecharon las larvas, y considerando los pesos iniciales y finales de las larvas y del residuo, se calcularon la eficiencia de conversión, el porcentaje de reducción de sustrato y la mortalidad. A partir de esto se observó que la aplicación de pretratamientos físicos permite disminuir el tamaño de partícula y la humedad, aumentando la superficie de contacto, facilitando la alimentación de las larvas. Además, el pretratamiento biológico logró una mayor disponibilidad de nutrientes, facilitando su asimilación por la larva, obteniendo una mayor reducción de sustrato y conversión alimenticia.

II. ANTECEDENTES

2.1 Residuos orgánicos agroindustriales

Los residuos agroindustriales son materiales sólidos o líquidos que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización que ya no son útiles para su proceso inicial (Corredor & Pérez, 2018). Estos son generados por las industrias alimentarias y agrícolas, y se pueden dividir en siete grupos: plantas oleaginosas, frutas y verduras, cereales, raíces y tubérculos, productos lácteos, pescados y mariscos, y productos cárnicos (Casas & Barrera, 2021). Los residuos orgánicos tienen una naturaleza muy heterogénea, con características físicas variables, dependiendo de la fuente, en cuanto contenido de humedad, poder calorífico, composición, y tamaño (Miezah et al., 2015).

Las características de los residuos dependen de la materia prima utilizada y del proceso al que han sido sometidos. Los residuos de frutas y vegetales están compuestos usualmente por semillas, cáscaras, pulpa e incluso por la fruta completa (Sagar et al., 2018). Se caracterizan por un alto porcentaje de humedad, de hasta el 90%, de la masa seca el 13.2% es proteína cruda y 72.6% carbohidratos, con una proporción de C/N de 24.4 (Lalander et al., 2019).

2.2 Aprovechamiento de residuos orgánicos

Derivado de la problemática que representan los residuos orgánicos, y considerando su contenido de energía y nutrientes, se ha investigado el potencial de diferentes tratamientos para su aprovechamiento, que disminuyan su impacto ambiental, y que creen empleos y recursos económicos (Corredor & Pérez, 2018). Estos tratamientos están enfocados en la transformación los residuos a productos de valor como harinas, fertilizantes, bioenergía, antioxidantes, enzimas, pigmentos, carotenoides,

proteínas unicelulares, fibra dietética, nanopartículas y plásticos biodegradables (Casas & Barrera, 2021). En el aprovechamiento de residuos existen diferentes tecnologías físicas, químicas y biológicas. Las técnicas biológicas consisten en la utilización de organismos como hongos, bacterias, lombrices e insectos (Lohri et al., 2017).

Los hongos han sido utilizados para aprovechar diferentes residuos, como vinaza a etanol y biomasa (Nair & Taherzadeh, 2016), fermentación de cáscaras de naranja y residuos de betabel para producir enzimas hidrolíticas (Marzo et al., 2019), producción de ácido cítrico a partir de caña de azúcar, pulpa de manzana y cítricos, residuos cerveceros, extractos de arroz y papa, residuos de café, etc. (Troiano et al., 2020), fermentación de residuos de alga para obtener mico proteína (Salgado et al., 2021), y residuos de pan a biomasa rica en proteína (Svensson et al., 2021).

Los microorganismos, como bacterias hidrolíticas, acidogénicas y metanogénicas, han sido utilizados para llevar a cabo digestiones anaeróbicas para producir energía renovable en forma de biogás, y digestato, un lodo con capacidad fertilizante (Meegoda et al., 2018). Algunos de los residuos orgánicos que han sido utilizados son frutas y verduras, efluente de producción de aceite de palma, desechos del procesamiento de lácteos, agua residual de yuca, papa, pepino, betabel, y vinaza (Srisowmeya et al., 2020), así como residuos de matadero (Handaous et al., 2019).

Igualmente, los microorganismos se emplean para realizar procesos de compostaje, donde se transforman productos orgánicos a productos fertilizantes estables en presencia de oxígeno (Awasthi et al., 2020). Algunos residuos procesados de esta forma son los restos de frutas y verduras (Ghinea & Leahu, 2020), restos de pescado (Toledo et al., 2018), restos de poda (Hernández-Lara et al., 2022), etc.

En el compostaje también participan otros organismos como lombrices (Ali et al., 2015), e insectos. Estos participan en la degradación de moléculas complejas a moléculas simples, que pueden funcionar como fertilizantes, así como, en la transformación de residuos a biomasa para alimentación animal. Insectos de los órdenes Diptera, Hymenoptera, Coleoptera, Hemiptera, Odonata, Lepidoptera, y Trichoptera presentan actividad antifúngica y péptidos antimicrobianos, por lo que al alimentarlos con residuos disminuyen los patógenos y olores (Surendra et al., 2020). Algunos insectos utilizados son los escarabajos japoneses, los grillos topo, la mosca doméstica, y la mosca soldado negro (Ayilara et al., 2020).

2.3 Mosca soldado negro

La mosca soldado negro es un díptero de la familia Stratiomyidae, nativa de regiones tropicales y templadas en América, se ha extendido por muchos países de los otros continentes. Es un insecto holometábolo, es decir, cuenta con fases larvarias y de pupa entre la etapa embrionaria y adulta (Figura 1). La etapa larvaria es la única fase de su ciclo de vida donde se alimentan, generando reservas de proteína y grasa necesarias para la reproducción (Dortmans et al., 2017).

Las larvas son capaces de consumir el doble de su peso en alimento por día, reduciendo la materia orgánica, generando biomasa rica en proteína y grasa con uso potencial como alimento para animales y producción de biodiesel (El-Hack et al., 2020). Además, la mosca disminuye los niveles de *Escherichia coli* de los residuos (Liu et al., 2008), y el *frass* (excretas, ecdisis) resultante de su producción ha mostrado resultados prometedores

como fertilizante (Menino et al., 2021).

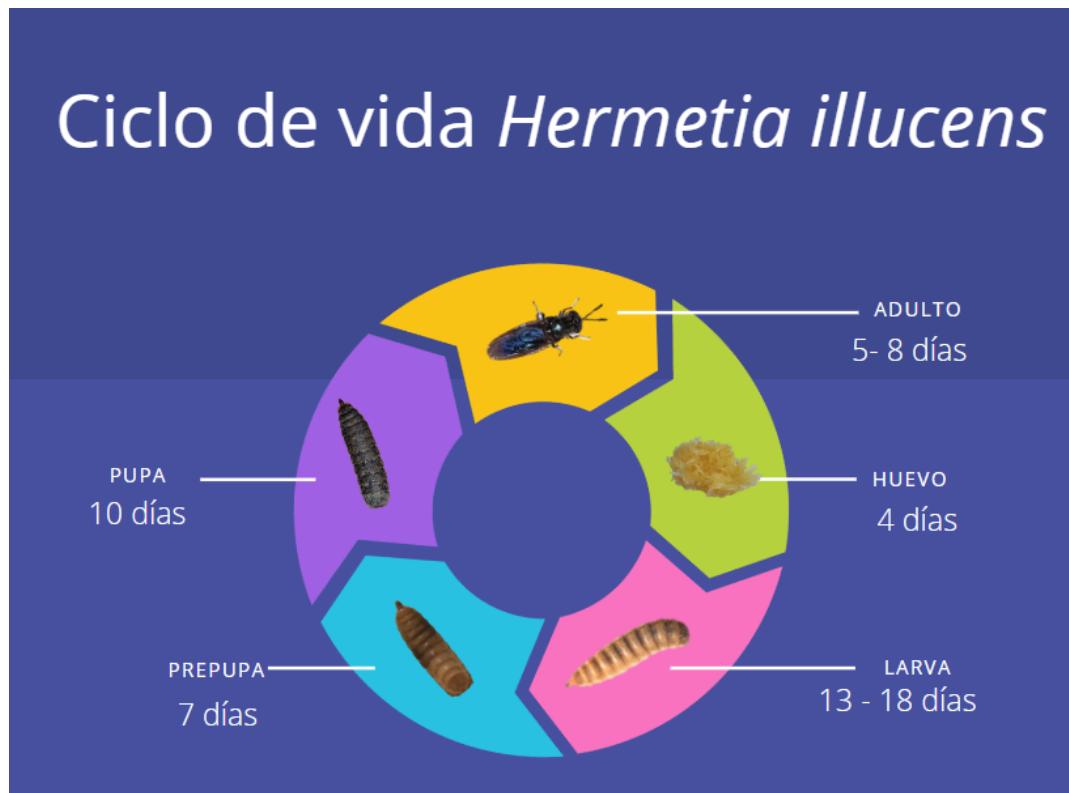


Figura 1. Ciclo de vida de *Hermetia illucens*, modificado de De Smet et al., 2018.

Las larvas son detritívoras generalistas, por lo que pueden alimentarse en diferentes sustratos, desde materiales duros hasta suaves, sólidos o líquidos, y de diferentes contenidos de humedad. En la naturaleza se alimentan comúnmente de frutas y verduras en descomposición, carroña, excremento de animales, y restos de procesamiento de pescado (Holmes et al., 2013). La larva es capaz de alimentarse de gran variedad de residuos por su diversidad de enzimas (amilasas, proteasas, lipasas) y microbiota intestinal (Kim et al., 2011). Además, su anatomía está relacionada con su forma de alimentación. Su cabeza al ser de forma cónica con paredes robustas facilita la penetración del sustrato alimenticio, y su complejo mandibular-maxilar le permite alimentarse de diferentes texturas. Se ha sugerido que la parte mandibular actúa como un órgano excavador,

mientras que el “área molar” de la parte inferior del aparato tritura la comida en partículas más pequeñas. Por estas características, se especula el aparato multifuncional de la larva se adapta fácilmente a la ingesta de comida semilíquida derivada de materia orgánica en descomposición (Bruno *et al.*, 2020).

2.4 Biotransformación

La biotransformación es la alteración de materia orgánica a productos aprovechables o fuentes de energía por medio de procesos o agentes biológicos, siendo uno de estos la larva de mosca soldado negro (Maurya *et al.*, 2021).

Se han realizado muchas investigaciones sobre la biotransformación de diferentes residuos mediante larva de mosca soldado negro. Los distintos tamaños, texturas, contenidos de humedad, composición nutricional y disponibilidad de nutrientes afectan la capacidad de la larva para alimentarse, repercutiendo directamente en su crecimiento, desarrollo y supervivencia, que a su vez afectan variables productivas (Tabla 1.). Para mejorar la biotransformación de residuos orgánicos mediante larva de mosca soldado negro se han probado pretratamientos que ayuden a facilitar su procesamiento (Nayak *et al.*, 2019).

Tabla 1. Biotransformación de distintos residuos orgánicos mediante larva de mosca soldado negro

Residuo	Condiciones de experimentación	Eficiencia de conversión	Reducción de sustrato (%)	Peso larva (mg)	Supervivencia (%)	Tasa de crecimiento	Referencia
Frutas y verduras	150 larvas 4 DOL Dosis 6 g dia ⁻¹	-	-	123	76.7	-	Nguyen et al., 2013
Pescado	-	-	-	143	47.2	-	
Manzana, pera, naranja	200 larvas 9 DOL Dosis <i>ad libitum</i>	-	-	174	96.44	-	Jucker et al., 2017
Lechuga, ejote, col	-	-	-	184	88.67	-	
Fruta (manzana, naranja, fresa, mandarina, pera, kiwi, plátano, limón)	0.05	70.8	-	80.7	0.007		
Verdura y fruta (apio, naranja, pimiento)	100 larvas 6 DOL Dosis <i>ad libitum</i>	0.07	65.2	-	88.8	0.006	Meneguz et al., 2018
Residuo vinícola	0.06	53	-	76.2	0.0006		
Residuo cervecero	0.14	42.5	-	90.5	0.014		
Pulpa de soya	0.36	-	138	98.5	0.0021		
Granos de cervecera	1000 larvas 2 DOL Dosis <i>ad libitum</i>	0.25	-	98	95.87	0.0014	Bava et al., 2019
Granos de maíz de destilería	0.27	-	197	73	0.0056		
Matadero	200 larvas 10 DOL Dosis 40 mg (materia seca) larva ⁻¹ dia ⁻¹	-	46.3	248	-	-	Lalander et al., 2019
Vegetales (lechuga, manzana y papa)	-	46.7	218	90.7	-		

Los términos utilizados por estos autores hacen referencia a lo siguiente:

Eficiencia de conversión del alimento digerido= biomasa de larvas/ (dieta total – dieta residual)

Reducción de sustrato= (dieta total- dieta residual/ dieta total) *100

Tasa de crecimiento= ganancia de peso/días de alimentación

2.5 Pretratamiento de residuos

El pretratamiento de residuos hace referencia a un proceso de transformación previo a otro procesamiento para obtención de bioproductos (Cho *et al.*, 2016). Estos métodos para desintegrar compuestos se dividen en tratamientos físicos (térmicos y de radiación), químicos (uso de ácidos y bases), fisicoquímicos (uso de agua caliente comprimida, termoquímica), mecánicos (sonicación), y biológicos (uso de microorganismos o enzimas). Las tecnologías anteriores son más utilizadas en el procesamiento de residuos para la obtención de productos de valor como etanol, biohidrógeno proteínas, enzimas, ácidos orgánicos, entre otros (Banu *et al.*, 2020).

La complejidad y variabilidad en la composición de los residuos orgánicos, y su alto contenido de humedad, dificultan su aprovechamiento, por lo que la aplicación de pretratamientos puede facilitar su procesamiento (Nayak *et al.*, 2019). Para mejorar el rendimiento en la producción de insectos, en el pretratamiento se modifican variables como la humedad, tamaño de partícula, textura, esterilización, homogenización y valor nutricional, variando el tratamiento dependiendo del tipo de sustrato. La combinación de tratamientos físicos y biológicos permite estabilizar a los residuos y aumenta la seguridad alimenticia (Law *et al.*, 2018).

2.5.2 Pretratamiento físico

El pretratamiento físico abarca todas las modificaciones físicas de los residuos orgánicos, que no involucren alteraciones químicas, incluyendo la disminución del tamaño de partícula y humedad del residuo (Cho *et al.*, 2016)

La reducción del tamaño de partícula hace referencia a todas las formas posibles en las que se pueden cortar o romper las partículas de un sólido para convertirlas en piezas más pequeñas. Con tal propósito, se pueden romper los sólidos mediante compresión o corte. El resultado siempre está compuesto de una mezcla de partículas que tienen un tamaño variable dentro de un intervalo (McCabe *et al.*, 2007).

Al reducir las dimensiones de las partículas aumenta el área de superficie, lo que le permite una mayor superficie de contacto, una mayor disponibilidad de nutrientes (Cortés *et al.*, 2009), y se facilita la hidrólisis (Palmowski & Miller, 2000). Además, un menor tamaño de partícula facilita el acceso a la larva (especialmente en frutas con cáscaras duras) (Ayilara *et al.*, 2020).

La humedad hace referencia a la cantidad de agua que hay en un material. El contenido de humedad se puede expresar en base seca o en base húmeda, en el caso de los residuos se utiliza el segundo, que establece el porcentaje de masa de agua que tiene un sólido en relación con su masa total (Martínes & Lira, 2010).

El contenido de humedad del sustrato afecta el desarrollo de la larva, cuando es muy elevado estas tienden a huir del sustrato, cuando es muy bajo previene un consumo eficiente (Álvarez, 2012). Un alto contenido de agua hace que el sustrato pierda su estructura, la cual es crucial para la aireación y el movimiento de la larva a través del residuo. Tomando en cuenta que las larvas respiran a través de espiráculos localizados en la parte anterior y posterior del cuerpo, al dificultar su movimiento en el sustrato también se podría afectar su capacidad de respirar adecuadamente (Lalander *et al.*, 2020). También, un porcentaje mayor de humedad facilita la alimentación, propiciando un crecimiento larvario más rápido, y disminuyendo el tiempo de producción (Cheng *et al.*, 2017).

Se han recomendado métodos de pretratamiento físico de los residuos para mejorar la biotransformación mediante la larva, como el uso de trituradoras y molinos de martillos, filtración con bolsas de tela, drenado por gravedad en contenedores perforados, y combinación de residuos con diferentes porcentajes de agua (Dortmans et al., 2017). A nivel experimental, se han reportado el uso de molinos (Lalander et al., 2019; Salomone et al., 2017; Meneguz et al., 2018), cuchillos (Lalander et al., 2019; Addeo et al., 2021), y procesadores de alimentos (Lalander et al., 2019). Sin embargo, pocos artículos reportan el efecto del pretratamiento en variables productivas de la larva.

En un estudio con desperdicios de cocina se encontró que en el residuo molido las larvas acceden a una mayor profundidad del residuo y tienen una mayor ganancia de peso (Brits, 2017). En otra investigación se compararon dos tamaños de partícula (4 y 6.35 mm) en cáscaras de almendra y se observó que con el tamaño de partícula mayor las larvas tuvieron mayor peso, y mayor porcentaje de biotransformación del residuo (Palma et al., 2019).

Al comparar porcentajes de humedad (70, 75, y 80%) en residuos de cocina, las larvas presentaron una tasa de crecimiento mayor en 80%, sin embargo, con ese porcentaje de humedad no es posible tamizarlas, mientras que con los porcentajes menores se tiene una eficiencia de tamizaje mayor a 85% (Cheng et al., 2017). En un trabajo se comparó 6 porcentajes de humedad (76, 84, 88, 90, 95, 97.5%) en residuos domiciliarios, y se observó que conforme aumenta la humedad del sustrato la supervivencia de las larvas disminuye, especialmente arriba de 90% de humedad, al igual que el peso de las larvas (Lalander et al., 2020). Igualmente, en residuos de vegetales y restos restauranteros se vio que el peso de las larvas y la tasa de

crecimiento aumenta a mayor humedad, comparando 60, 70, y 80% (Khairuddin et al., 2022). En otro trabajo, se encontró que se obtienen larvas de mayor peso y con mayor supervivencia al disminuir la humedad de diferentes residuos vegetales (manzana, col, cebolla morada y calabaza) hasta el 70% de humedad (Ribeiro et al., 2022).

2.5.3 Pretratamiento biológico

El pretratamiento biológico consiste en la utilización de microorganismos y/o enzimas para hacer una predigestión del residuo. Suele ser un proceso más lento y difícil de controlar en comparación con los pretratamientos físicos y químicos, pero es más económico, requiere menos energía y tiene menor impacto ambiental. Dependiendo de la biomasa a tratar se elige un consorcio de microorganismos que tengan la composición enzimática y actividad hidrolítica adecuada (Sharma et al., 2019).

Como parte de las actividades de los microorganismos están las fermentaciones. Una fermentación es una descomposición natural donde se da una transformación química de sustancias orgánicas complejas a compuestos más simples por la acción del metabolismo de microorganismos como bacterias, levaduras y mohos (Xiang et al., 2019). Son métodos utilizados para la preservación de comida y bebidas, ya que durante la transformación del sustrato sucede una oxidación de carbohidratos a productos como ácidos orgánicos, alcohol y dióxido de carbono, productos que inhiben o reducen la proliferación de microorganismos no deseados. Así como, formación de productos deseados que mejoren la calidad del sabor, o que tengan importancia para la salud como vitaminas, antioxidantes y péptidos bioactivos (Ross et al., 2002).

Se pueden clasificar las fermentaciones de acuerdo con el producto de la reacción, siendo las principales la láctica, butírica, alcohólica y acética. La fermentación láctica es llevada a cabo por bacterias, hongos y algunas células animales, a partir de lácteos, hortalizas, legumbres, carnes y pescados producen ácido láctico (fermentación homoláctica) como producto anaeróbico de la glicólisis, y otros sustancias como ácido acético y fórmico (fermentación heteroláctica) (Abdel-Rahman et al., 2013). La fermentación butírica se da en más de 10 especies de bacterias anaeróbicas de los géneros *Clostridium*, *Butyrvibrio*, *Butyribacterium*, *Eubacterium*, *Fusobacterium*, *Megasphaera* y *Sarcina*. Usan como sustrato varias fuentes de carbono como hexosa, pentosa, glicerol, lignocelulosa, melaza, glucosa, xilosa, fructosa, maltosa, ribosa, etc., y hay producción de ácido butírico (Zhang et al., 2009). La fermentación alcohólica es la transformación de azúcares, principalmente fructosa y glucosa, a etanol y dióxido de carbono, por levaduras y algunas bacterias como *Zymomonas mobilis* (Zamora, 2009). La fermentación acética es el siguiente paso de la fermentación alcohólica, donde se da la oxidación moléculas de alcohol a ácido acético por acción de la bacteria *Acetobacter* (Silva et al., 2007).

El pretratamiento de fermentación láctica cumple con dos objetivos: aumentar la digestibilidad de las moléculas del residuo y alargar su vida útil. Esta es llevada a cabo por bacterias ácido-lácticas de algunos géneros como *Leuconostoc*, *Lactobacillus*, *Weisella*, *Enterococcus* y *Pediococcus*. Estas son parte de la microbiota autóctona de las frutas y vegetales (Di Cagno et al., 2013). Este proceso ayuda a la preservación del sustrato, ya que hay síntesis de una gran variedad de metabolitos antagonistas primarios y secundarios, incluyendo ácidos orgánicos, dióxido de carbono, etanol, peróxido de hidrógeno y diacetilo, así como compuestos antifúngicos como ácidos grasos, ácido feniláctico, bacteriocinas y antibióticos (Fan & Hansen, 2012). En las primeras etapas de la fermentación se inhibe el

crecimiento de bacterias Gram-negativas, debido a que sucede una reducción sustancial del pH que inhibe el crecimiento de organismos de descomposición y patógenos, y por ende aumenta su vida de anaquel. Esto puede resultar muy útil ya que al recibir grandes cantidades de residuos que no se utilizan inmediatamente es necesario almacenarlos de forma que se mantenga su calidad nutricional y microbiológica durante semanas. La fermentación también incrementa la digestibilidad del material en animales de granja, por lo que se especula que pueda tener el mismo efecto en insectos (Van Campenhout, 2021).

Muchos componentes de residuos agrícolas se encuentran de forma insoluble en forma de moléculas complejas que pueden ser degradadas durante la fermentación a través de la hidrólisis de sus enlaces glucosídicos (Law *et al.*, 2018). Esto da como resultado moléculas más simples, que requieren de menor gasto energético para ser procesadas por la larva, al ingerirlas previamente degradadas disminuye el tiempo de digestión ya que pueden ser absorbidas directamente por las células del intestino, especialmente en residuos ricos en celulosa y hemicelulosa (Gold *et al.*, 2018).

Dentro de los pretratamientos biológicos aplicados a residuos para producción de larva de mosca soldado negro se ha reportado el uso de diferentes microorganismos como consorcios bacterianos, algunas especies de bacterias, hongos, y enzimas, así como distintos tiempos de fermentación. Se ha observado que la aplicación de diferentes cepas de *Bacillus* a excremento de aves de corral puede aumentar la ganancia de peso de la larva en hasta 22% (Yu *et al.*, 2011). En residuos de restaurante y paja de arroz se ha visto que la adición de Rid-X (formulación de microorganismos y enzimas) aumenta al doble la tasa de conversión de celulosa y hemicelulosa (Zheng *et al.*, 2012). También, la aplicación de Rid-

X en endospermo de coco genera mayor ganancia de peso y tasa de crecimiento en las larvas (Wong et al., 2020). Con cáscara de plátano se ha reportado en las larvas un aumento de 11% de peso al fermentar el residuo con microorganismos aislados del intestino de la larva (Gao et al., 2019). Mientras que en cáscaras de naranja fermentadas con *Trichoderma reesei* se observa una eficiencia de conversión y ganancia de peso menor en las larvas (Lindberg et al., 2022^a). Así mismo, en paja de maíz fermentada con *Aspergillus oryzae* se reporta un peso de larva menor, y fecundidad en adultos disminuida (Gao et al., 2019).

En cuanto a la aplicación de enzimas, se ha observado que al añadir un coctel de enzimas (SAE0020 Sigma-Aldrich), con celulasas, β -glucosidasas y hemicelulasas, a residuos de col y lechuga, aumenta 22% la eficiencia de conversión, y 14% la reducción del sustrato (Lindberg et al., 2022^b). También, se ha reportado el pretratamiento de torta de palmiste con celulasa, obteniendo larvas 2.4 veces más pesadas (Lim et al., 2022). En digestato (proveniente de frutas, verduras, residuos de jardín, lodo de procesamiento de lácteos y tratamiento de aguas) se probó la aplicación del complejo enzimático Accellerase® DUET, logrando larvas con el doble de peso en comparación con el residuo sin tratamiento (Pas et al., 2022).

III. HIPÓTESIS

El pretratamiento físico-biológico de residuos orgánicos agroindustriales permite incrementar de forma significativa la conversión alimenticia, la reducción de sustrato y la supervivencia de larva de mosca soldado negro, en comparación con el residuo sin pretratamiento.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Establecer el pretratamiento físico-biológico de residuos orgánicos que permita aumentar su biotransformación utilizando la larva de mosca soldado negro.

4.2 Objetivos particulares

- Determinar la dosis de alimentación adecuada para las larvas de cada residuo orgánico a partir de su valor de conversión alimenticia, para la estandarización de la dieta
- Determinar el efecto de los pretratamientos sobre los diferentes residuos orgánicos mediante su caracterización fisicoquímica
- Determinar el efecto del pretratamiento en la biotransformación de residuos orgánicos en larva de mosca soldado negro, a través del análisis de variables productivas de la larva

V. METODOLOGÍA

El proyecto fue realizado en la Planta Piloto de producción de mosca soldado negro y en el Laboratorio de Bioingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de ingeniería campus Amazcala.

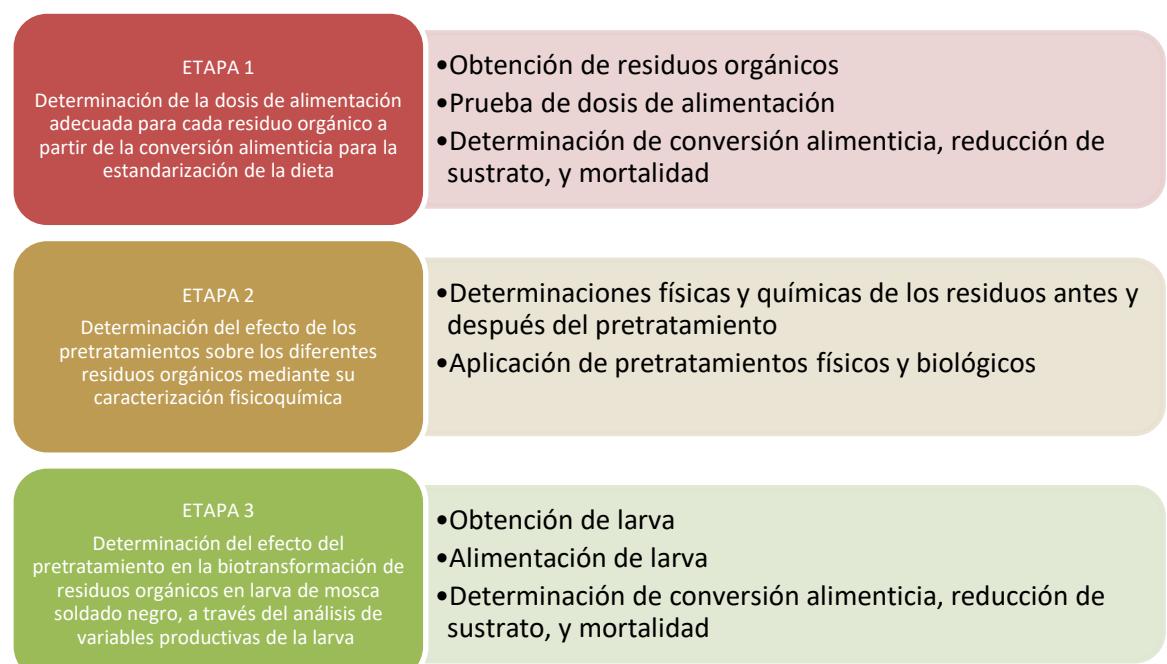


Figura 2. Diagrama de etapas del trabajo de investigación.

5.1 Determinación de la dosis de alimentación adecuada para las larvas de cada residuo orgánico a partir de su valor de conversión alimenticia para la estandarización de la dieta

5.1.1 Obtención de residuos orgánicos

Se obtuvieron residuos de mango manila en descomposición de la central de Abastos de Querétaro. Los residuos de tilapia fueron obtenidos de la

producción acuícola del Laboratorio de Bioingeniería. El residuo de bagazo de cerveza fue obtenido de un productor de cerveza artesanal.

Los residuos de mango fueron pesados y separados en pulpa, semilla y cáscara (Figura 3). Posteriormente, se congelaron por separado a -18°C para su posterior uso. El residuo de bagazo de cerveza fue congelado completo (Figura 4). El residuo de tilapia fue congelado completo (Figura 5).



Figura 3. Residuos de mango manila (izquierda), separación de pulpa, cáscara y semilla del mango (derecha)



Figura 4. Residuo de bagazo de cerveza



Figura 5. Residuo de tilapia

5.1.2 Obtención de la larva

Se obtuvieron larvas de mosca soldado negro de 5 DOL (días de vida) (Figura 6), previamente alimentadas con dieta Gainesville, de la Planta Piloto de Producción de Mosca Soldado Negro de la Universidad Autónoma de Querétaro. Se tamizaron las larvas para separarlas del residuo.



Figura 6. Larvas de mosca soldado negro de 5 DOL

5.1.3 Prueba de dosis alimenticia

Se seleccionaron 3 tasas de alimentación para determinar la ración a utilizar para cada residuo: 1.5, 2, y 2.5 g larva⁻¹. Estas pruebas se realizaron con 30 larvas por repetición con dosis para 10 días, es decir, 45, 60, y 75 g de alimento, con 3 repeticiones por dosis. Se utilizaron contenedores de plástico de 250 ml (Figura 7 y 8), a los cuales se les hizo múltiples perforaciones en la tapa para permitir el paso de aire y una malla para evitar la entrada de otros insectos. Las larvas fueron contadas, pesadas individualmente en una balanza analítica y colocadas en los contenedores con los residuos (Parra *et al.*, 2015).



Figura 7. Contenedores de plástico con residuo de pulpa de mango, cáscara y semilla de mango, y dieta Gainesville



Figura 8. Contenedores de plástico con residuo de tilapia y cerveza

Posteriormente, se colocaron los contenedores dentro de una incubadora Thermo Scientific Heratherm, a 28°C (figura 9).

Se estuvieron monitoreando las larvas hasta llegar al día de peso máximo, cada 2 días se sacaron del residuo utilizando pinzas entomológicas y se colocaron sobre toallas absorbentes para retirar el residuo que tuvieran pegado. Despues se pesaron individualmente, se contaron las larvas

muertas y se regresaron a sus respectivas cajas. Los pesos obtenidos se utilizaron para obtener una curva de ganancia de peso de la larva para cada residuo.



Figura 9. Colocación de contenedores experimentales en incubadora a 28°C

5.1.4 Determinación de conversión alimenticia, reducción de sustrato y mortalidad

Para la determinación de las variables productivas de la larva se utilizaron las siguientes fórmulas:

Conversión alimenticia

La conversión alimenticia fue calculada con la siguiente fórmula (Meneguz *et al.*, 2018b):

$$CA = \frac{\text{Alimento en seco suministrado (g)}}{\text{Ganancia de peso en seco (g)}} \quad (1)$$

Mortalidad

La mortalidad fue calculada con la siguiente fórmula (Meneguz *et al.*, 2018b):

$$M = \left[\frac{\text{Número inicial de larvas} - \text{Número final de larvas}}{\text{Número inicial de larvas}} \right] \times 100 \quad (2)$$

Reducción de sustrato

Se calculó la reducción del sustrato con la siguiente fórmula (Meneguz *et al.*, 2018b):

$$RS = \frac{\text{Sustrato provisto (g)} - \text{Sustrato residual (g)}}{\text{Sustrato provisto (g)}} \times 100 \quad (3)$$

5.2 Determinación del efecto de los pretratamientos sobre los diferentes residuos orgánicos mediante su caracterización fisicoquímica

5.2.1 Diseño experimental

Se consideró un diseño completamente al azar para cada residuo orgánico, donde se seleccionaron 8 tratamientos para el residuo de mango, 2 tratamientos para el residuo de tilapia, 3 tratamientos para el residuo de bagazo de cerveza, y el control de dieta Gainesville (Figuras 10, 11, 12). Se hizo cada tratamiento por triplicado y para cada repetición se utilizaron 30 larvas.

Para el residuo de mango se escogieron los siguientes tratamientos:

1. Mango completo entero
2. Mango completo molido
3. Mango completo molido y fermentado
4. Pulpa entera
5. Pulpa fermentada
6. Semilla y cáscara entera
7. Semilla y cáscara molida
8. Semilla y cáscara molida y fermentada

Control

Repeticiones		
T6	T3	T4
T8	T6	T5
Control	T8	T1
T2	T7	T3
T3	T4	Control
T5	Control	T8
T1	T2	T7
T7	T5	T2
T4	T1	T6

Figura 10. Diseño experimental para el residuo de mango

Para residuo de tilapia se seleccionaron los siguientes tratamientos:

1. Tilapia entera

2. Tilapia molida

Control

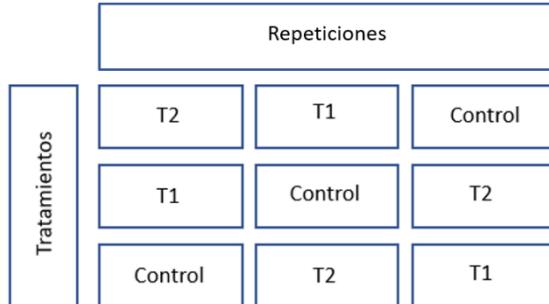


Figura 11. Diseño experimental para el residuo de tilapia

Para el residuo de bagazo de cerveza se utilizaron los siguientes tratamientos:

1. Bagazo de cerveza entero

2. Bagazo de cerveza molido

3. Bagazo de cerveza fermentado

Control

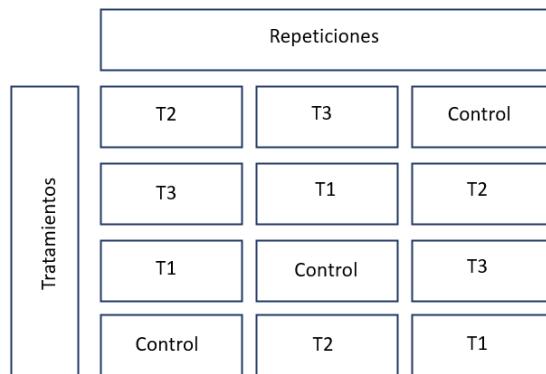


Figura 12. Diseño experimental para el residuo de bagazo de cerveza

5.2.2 Pretratamiento físico

Los residuos de mango y de bagazo de cerveza se molieron en un procesador de alimentos marca Vorweck modelo TM5 con potencia de 500 W. El residuo de tilapia fue triturado en una licuadora doméstica.

5.2.3 Pretratamiento biológico

Se fermentaron los residuos de mango y bagazo de cerveza. Para fermentar los residuos se utilizaron cubetas de polietileno herméticas de 6.3 litros, a las cuales se les añadió un airlock para permitir la salida de gas durante la fermentación (figura 13). Los residuos se trituraron y se colocaron en los contenedores, donde se dejaron fermentar hasta que se estabilizó el pH. Se mantuvieron las cubetas en un cuarto a 27°C. Durante la fermentación se monitoreó el pH cada 2 días, y se realizaron las determinaciones bromatológicas después del procesamiento.



Figura 13. Cubeta acondicionada con airlock para la fermentación de residuos

5.2.4 Determinaciones fisicoquímicas antes y después del pretratamiento

Se hizo un análisis bromatológico de los residuos orgánicos antes de la aplicación del pretratamiento, así como una determinación del tamaño de partícula y medición del pH. Después de la aplicación de los pretratamientos físicos se determinó nuevamente el tamaño de partícula y la humedad, mientras que posterior a los pretratamientos biológicos se midió el pH y se hizo análisis bromatológico. Las determinaciones consideradas fueron las siguientes:

Determinación de humedad, cenizas, grasas, proteínas, fibra cruda y carbohidratos totales

La determinación de la humedad se hizo bajo el método NMX-F-083-1986, la de cenizas se hizo por el método NMX-F-607-NORMEX-2020, la de grasas por el método NOM-086-SSA1-1994 Apéndice Normativo C, Numeral 1, la de proteínas por el método NMX-F-608-NORMEX-2011, la fibra cruda por el método NMX-613-NORMEX-2017, y carbohidratos totales por diferencia del análisis proximal.

Medición de pH

Para medir el pH del residuo se tomaron 3 muestras de 10 g que se colocaron en un matraz con 17 ml de agua destilada, y se midieron utilizando un potenciómetro (Meneguz *et al.*, 2018a).

Determinación del tamaño de los residuos

El rango de tamaño de los residuos se determinó utilizando un vernier (Spreer *et al.*, 2011).

5.3 Determinación del efecto del pretratamiento en la biotransformación de residuos orgánicos en larva de mosca soldado negro, a través del análisis de variables productivas de la larva

5.3.1 Alimentación de las larvas con residuos orgánicos pretratados

Después de determinar la dosis de alimentación, se alimentaron las larva con la dosis seleccionadas para cada residuo. Se adicionó cada residuo en los contenedores plásticos de 250 ml, utilizando 3 cajas por tratamiento, donde posteriormente se agregaron 30 larvas por caja. Los contenedores se colocaron dentro de la incubadora, y se repitió el proceso de pesaje y monitoreo de mortalidad cada dos días, hasta llegar al día de peso máximo (Lalander *et al.*, 2019).

5.3.2 Determinación de conversión alimenticia, reducción de residuos y mortalidad

A partir de los datos obtenidos de peso máximo promedio, cantidad de alimento suministrada, cantidad de alimento sobrante, y número de larvas muertas se calcularon la eficiencia de conversión, la reducción del sustrato, y la mortalidad con las fórmulas del apartado 5.1.4.

5.4 Análisis estadístico

Para evaluar el efecto de los pretratamientos sobre la biotransformación mediante larva de mosca soldado negro se realizaron pruebas de normalidad, de homocedasticidad, análisis de varianza, y pruebas de comparación de medias múltiples con el software JMP.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Determinación de la dosis de alimentación adecuada para las larvas de cada residuo orgánico a partir de su valor de conversión alimenticia para la estandarización de la dieta

6.1.1 Curvas de ganancia de peso

En las curvas de ganancia de peso se observa el comportamiento de las larvas a lo largo de los días de alimentación. Las larvas alimentadas de mango completo tuvieron una baja ganancia de peso comparado con las larvas de pulpa, a pesar de tener pulpa también (figura 14), esto puede haber sucedido por la presencia de taninos que se liberaron de la semilla al molerla (Cruz et al., 2022), ya que los taninos son inhibidores de crecimiento en insectos (Barbehenn & Constabel, 2011).

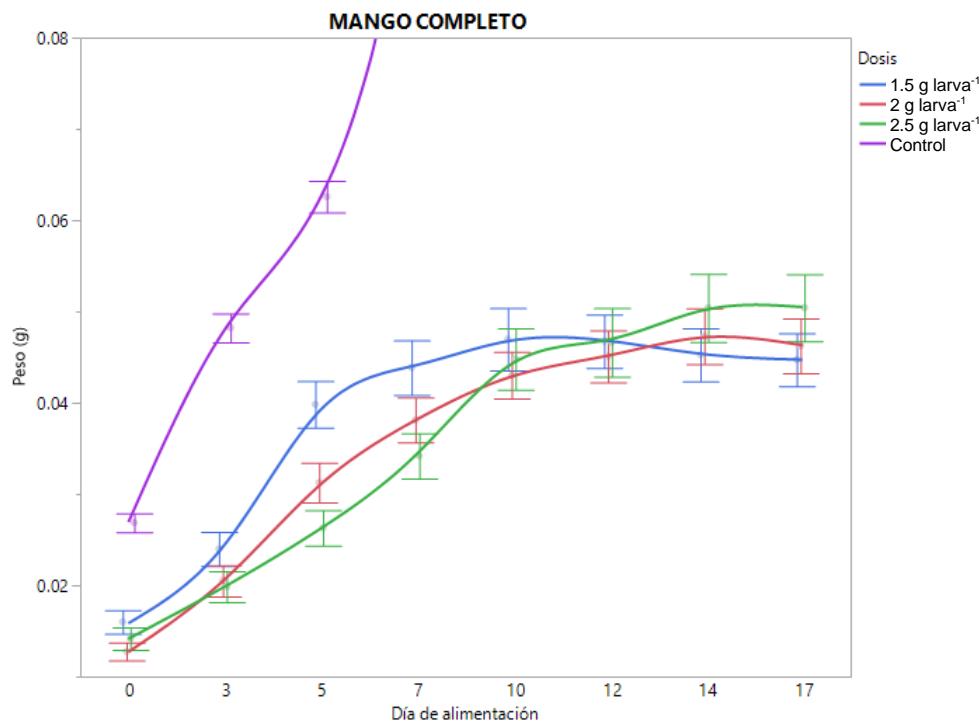


Figura 14. Curvas de ganancia de peso larvario a lo largo del tiempo de alimentación con residuo de mango completo con tres dosis de alimentación (media ± error estándar, n=30)

En las larvas del residuo de semilla y cáscara de mango también se observó poco crecimiento, presentaron una ganancia de peso inicial muy marcada, pero se mantuvo por varios días oscilando en el mismo peso, hasta el día 14 se vio otra vez un aumento de peso significativo (Figura 15). Este comportamiento puede ser debido a que al principio las larvas se alimentaron de los restos de pulpa adheridos a la semilla y a la cáscara, y el segundo crecimiento marcado puede ser por la acción de microorganismos presentes en el residuo que ayudaron a descomponerlo y volverlo más disponible para las larvas.

Las larvas alimentadas con pulpa y tilapia mostraron un comportamiento de ganancia de peso similar al control (figura 16 y 17). Mientras que el bagazo de cerveza en sus tres dosis se encuentra por encima del control (figura 16).

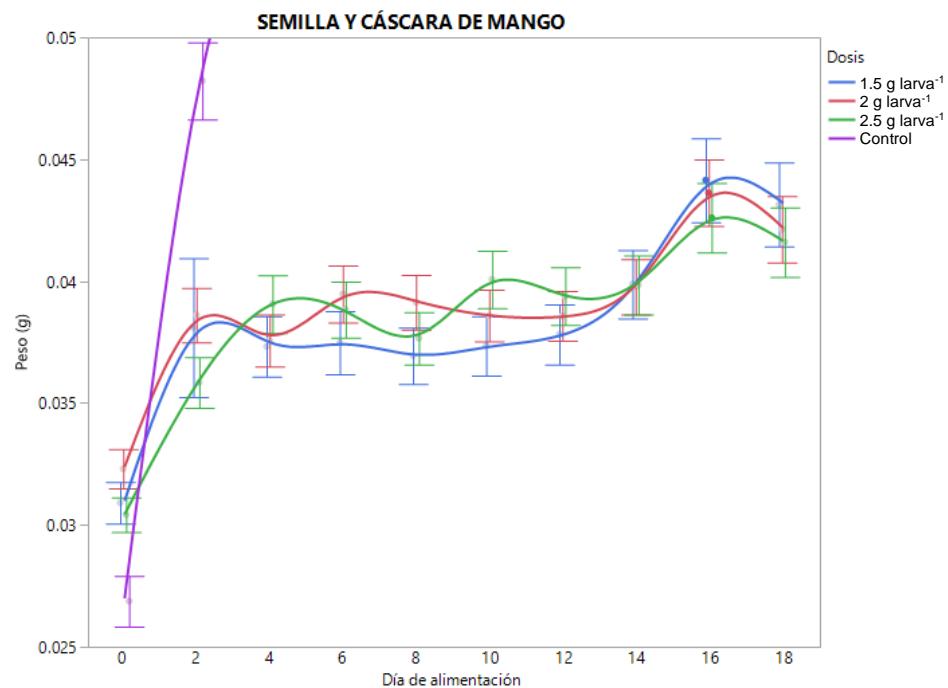


Figura 15. Curva de ganancia de peso larvario a lo largo del tiempo de alimentación con residuo de semilla y cáscara de mango, con tres dosis de alimentación (media \pm error estándar, n=30)

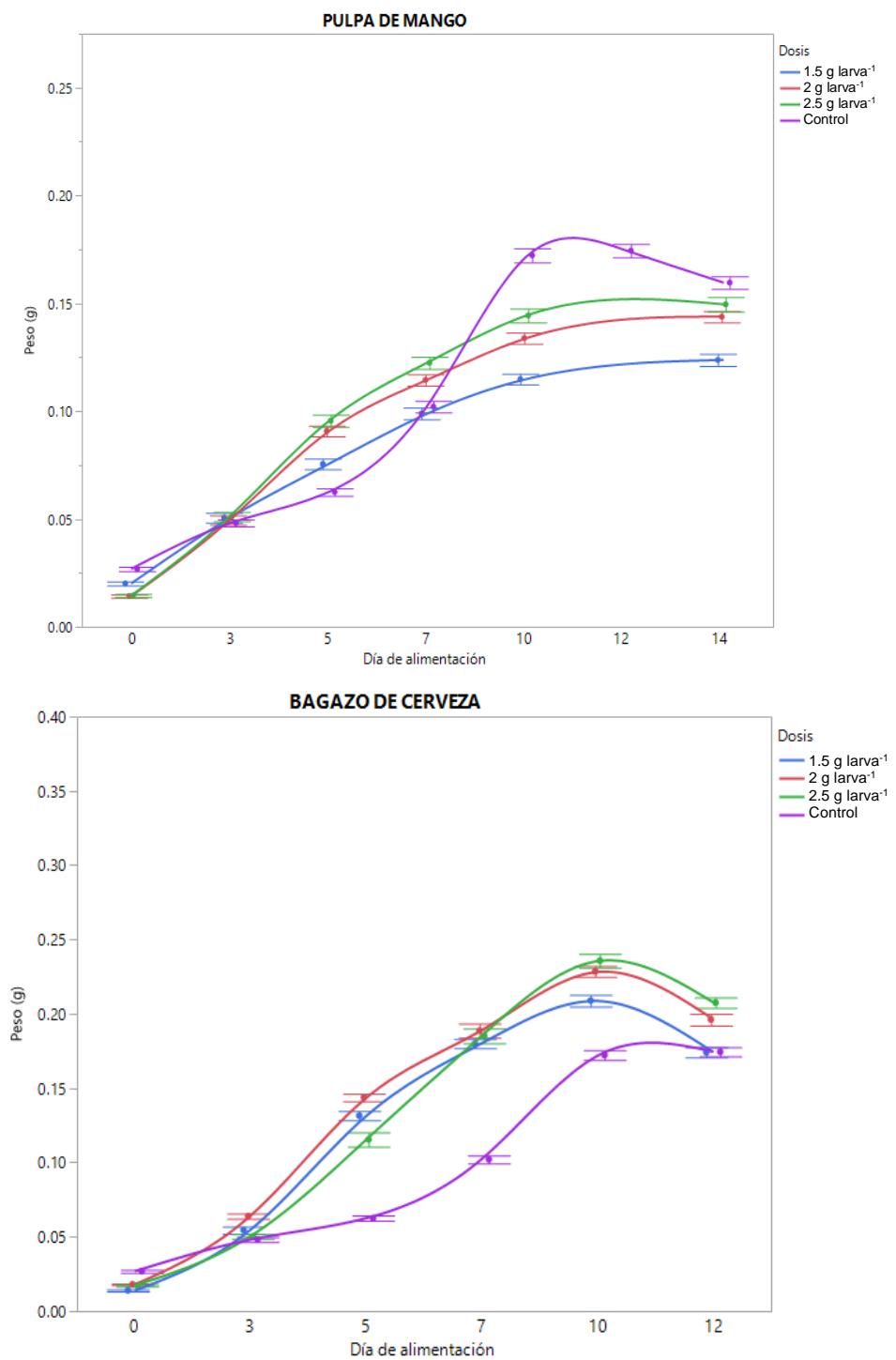


Figura 16. Curvas de ganancia de peso larvario a lo largo del tiempo de alimentación con residuo de pulpa de mango y de bagazo de cerveza (media \pm error estándar, n=30)

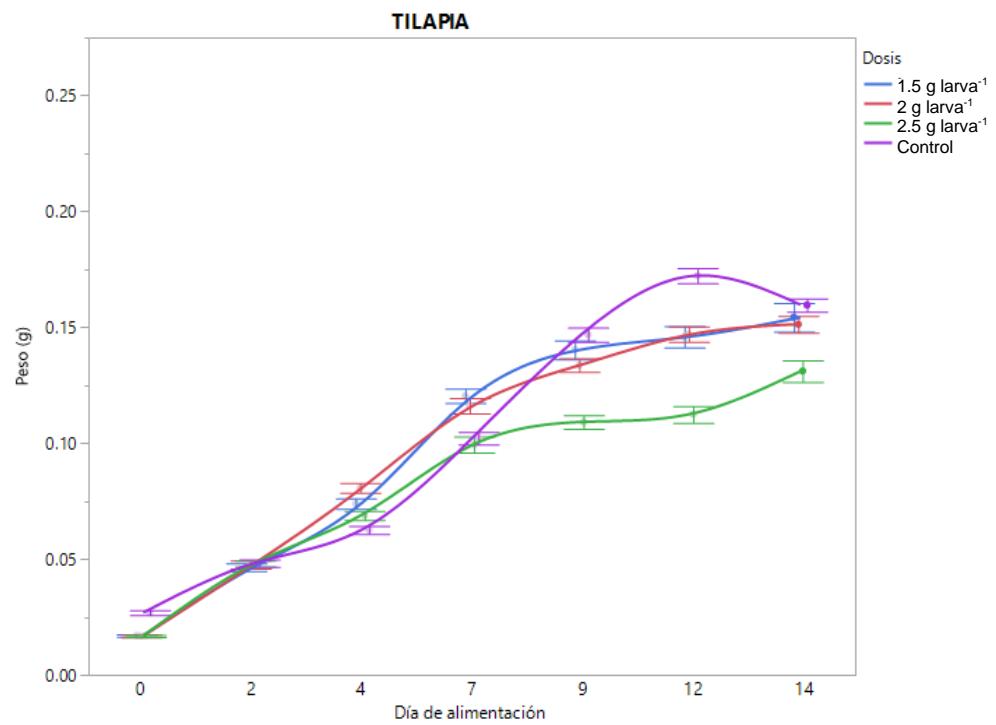


Figura 17. Curvas de ganancia de peso larvario a lo largo del tiempo de alimentación con residuo de tilapia con tres dosis de alimentación (media \pm error estándar, n=30)

6.1.2 Análisis de variables productivas

En la tabla 2 se muestra las variables productivas medidas y calculadas en la prueba de dosis para cada residuo. Se realizó el análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey- Kramer. Se notó que se lograron mayores pesos de larva a mayor dosis de alimentación, a excepción del residuo de semilla y cáscara de mango, y el residuo de tilapia. El menor peso obtenido fue 0.043 g en larvas alimentadas con semilla y cáscara, mientras que el mayor peso fue de 0.236 g a partir de la dosis más alta de bagazo de cerveza, siendo este incluso mayor que el obtenido en la dieta control de 0.174 g. Además, las larvas alimentadas con bagazo de cerveza llegaron a su peso máximo en 10 días de alimentación, comparado con la dieta control que se extendió hasta 12 días. Aplicado a un sistema productivo se buscaría aquel alimento que dé el mejor rendimiento en la menor cantidad de tiempo.

En comparación, se obtuvo mejor eficiencia de conversión y reducción del sustrato en la dosis más baja para todos los residuos. La mayor eficiencia de conversión alimenticia se presentó con la tilapia, seguido de cerca por el bagazo de cerveza y la pulpa de mango. Sin embargo, las larvas alimentadas con tilapia mostraron una mortalidad muy alta comparada con el resto de los residuos, aunque fue menor a aquella reportada en otros estudios. En un estudio donde se utilizó residuos de pescado (perca y rutilo), compuestos por los órganos y las aletas, para alimentar larvas de 5-7 DOL, se encontró que hay un 100% de mortalidad al segundo día de alimentación (Isibika et al., 2021). En otro estudio se obtuvo 52.78% de mortalidad en larvas 4DOL alimentadas con restos de pescadería (Nguyen et al., 2013). En estos trabajos se concluye que para disminuir la mortalidad se puede combinar con otros tipos de residuos.

A partir de estos resultados y de acuerdo con el objetivo de mejorar la biotransformación de los residuos, se seleccionó la dosis más baja para la alimentación de las larvas en la siguiente etapa de experimentación.

Tabla 2. Análisis de variables productivas de la larva por dosis para cada residuo orgánico

Residuo	Dosis (g larva ⁻¹)	Peso máximo (g)*	Día de alimentación de peso máximo	Conversión alimenticia (g/g)	Reducción de sustrato (%)	Mortalidad (%)
Control	2	0.174±0.003 ^c	12	13.67	41	3.33
Mango completo	1.5	0.047±0.003 ^g	10	35.48	46.91	0
	2	0.047±0.003 ^g	14	43.13	50.63	0
	2.5	0.051±0.003 ^g	17	50.92	48.93	0
Pulpa de mango	1.5	0.124±0.002 ^{bf}	14	8.68	41	4.44
	2	0.144±0.002 ^{de}	14	9.59	34	0
	2.5	0.150±0.003 ^d	14	11.52	40	2.22
Semilla y cáscara de mango	1.5	0.044±0.001 ^g	16	111.36	30.97	2.22
	2	0.044±0.001 ^g	16	157.95	26.58	3.33
	2.5	0.043±0.001 ^g	16	247.73	27.44	0
Bagazo de cerveza	1.5	0.209±0.003 ^b	10	7.18	75.32	0
	2	0.229±0.003 ^a	10	8.87	48	0
	2.5	0.236±0.004 ^a	10	10.87	45	0
Tilapia	1.5	0.154±0.006 ^d	14	9.1	64.63	18
	2	0.151±0.003 ^d	14	12.4	56.2	8
	2.5	0.131±0.004 ^{ef}	14	18.2	44.62	15

*Medias ± error estándar, n=30. Comparación de medias entre todos los tratamientos

6.2 Determinación del efecto de los pretratamientos sobre los diferentes residuos orgánicos mediante su caracterización fisicoquímica

6.2.1 Humedad, tamaño de partícula y pH de los residuos

Todos los residuos tuvieron un pH inicial ácido. En todos los tratamientos de fermentación se notó una reducción del pH de los residuos (tabla 3), por lo que se concluyó que sí se dio un proceso fermentativo donde hubo producción de ácidos orgánicos. En el caso de la tilapia, solo se incluye el pH inicial ya que este no tuvo proceso de fermentación.

Tabla 3. Caracterización de los residuos orgánicos antes y después de los pretratamientos

Residuo	Tratamiento molido		Tratamiento fermentado		
	Humedad (%)	Tamaño inicial (cm)	Tamaño final (cm)	pH inicial	pH final
Mango completo	78.05	10-13	0.5-1	4.51	3.68
Pulpa de mango	81.37	2.1-8	-	5.61	3.64
Semilla de mango	69.5	7-9	0.4-1	4.61	3.95
Cáscara de mango		4-11			
Bagazo de cerveza	72	0.6-0.9	0.1-0.4	4.33	3.49
Tilapia	75	15-30	0.3-0.5	6.4	-

En la tabla 3 se muestra la modificación del tamaño de partícula por el tratamiento de molienda. En el caso de la pulpa no se aplicó este tratamiento ya que al encontrarse los mangos en proceso de descomposición la textura estaba muy friable, y al momento de separarla de la semilla tenía a

desintegrarse, dependiendo también del grado de madurez quedan trozos más grandes al encontrarse más verde, y pedazos más pequeños a mayor madurez. La semilla al ser más dura quedó en trozos un poco más grandes. La tilapia se molió bien, a excepción de algunos trozos de aleta y escamas que quedaron de tamaños mayores. En cuanto a la humedad, todos los residuos presentaron un porcentaje aceptable para el desarrollo de la larva, siendo únicamente el residuo de semilla y cáscara de mango levemente menor.

6.2.2 Composición bromatológica de los residuos

El residuo con una composición nutricional más similar a la del control fue el bagazo de cerveza, en cuanto a grasas y proteína, variando un poco más en el porcentaje de fibra y carbohidratos totales (Tabla 4). Los tres residuos de mango presentaron una composición similar de todos sus analitos, siendo estos bajos en proteínas y grasas, y muy altos en carbohidratos. En cambio, la tilapia se caracterizó por un porcentaje muy alto de proteína, seguido por el contenido de grasa.

Se puede observar en todos los residuos un aumento en el porcentaje de grasas y proteínas después del pretratamiento de fermentación, siendo la pulpa la que aumentó más su contenido de proteína, mientras que para los tres residuos disminuyó el porcentaje de carbohidratos. El aumento de estas moléculas podría adjudicarse a la actividad y crecimiento de los diversos microorganismos presentes en el sustrato, esto ha sido observado en otros procesos fermentativos (Sun et al., 2022).

Tabla 4. Análisis bromatológico de los residuos orgánicos

	Control	Mango completo	Pulpa de mango	cáscara de mango	Semilla y cáscara de mango	Bagazo de cerveza	Tilapia	
	SF	SF	F	SF	F	SF	F	SF
Humedad (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
48 Cenizas (%)	9.9	4.09	7.10	3.14	20.38	3.30	5.32	2.38
Grasas (extracto etéreo) (%)	3.97	1.18	7.24	1.39	11.91	1.30	8.50	2.47
Proteínas (%)	13.42	4.62	11.28	4.58	26.65	4.14	7.63	15.28
Fibra cruda (%)	42.99*	5.71	13.02	5.00	<3.13	6.77	11.51	14.54
Carbohidratos totales (%)	29.7	85.72	63.22	86.85	41.07	86.84	69.03	69.86
								64.89
								0.40

SF – Sin fermentar, F- Fermentado, *Fibra detergente neutro

6.3 Determinación del efecto del pretratamiento en la biotransformación de residuos orgánicos en larva de mosca soldado negro, a través del análisis de variables productivas de la larva

6.3.1 Curvas de ganancia de peso

En las curvas de ganancia de peso se observa que las larvas alimentadas con pulpa de mango tuvieron un comportamiento similar entre tratamientos de residuo entero y fermentado, quedando por debajo el tratamiento de fermentado (Figura 18). En las larva alimentadas con mango completo se nota un aumento de peso muy bajo, tardándose hasta 20 días de alimentación para llegar a su peso máximo, casi el doble que el control (Figura 19). En las larvas del residuo de semilla y cáscara de mango se observa un contraste muy grande en el crecimiento, siendo que las larvas del tratamiento entero y fermentado llegaron a su peso máximo en menos tiempo que las del tratamiento molido e incluso que el control, además, se nota un incremento de más del doble del peso de las larvas en estos dos tratamientos (Figura 19).

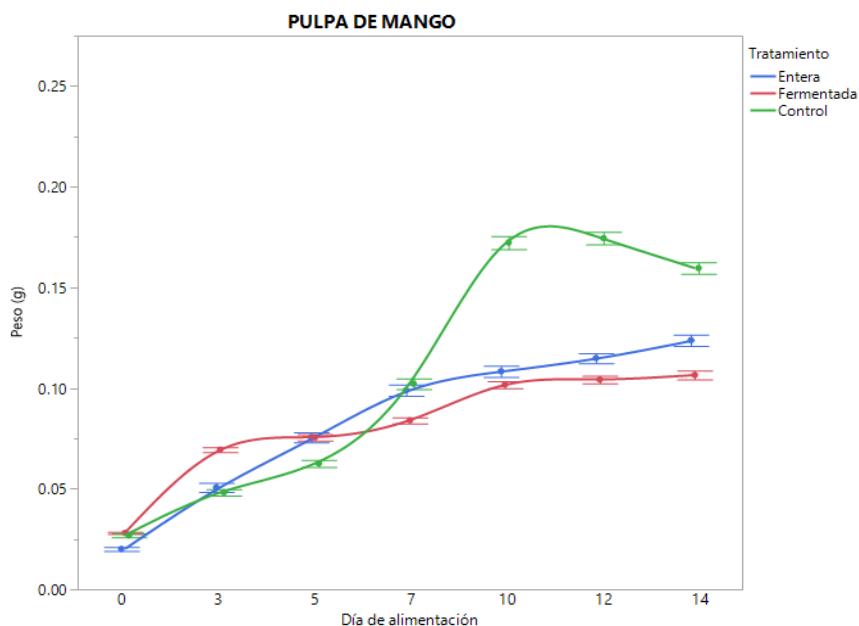


Figura 18. Curva de ganancia de peso con residuo de pulpa de mango con diferentes tratamientos (media ± error estándar, n=30)

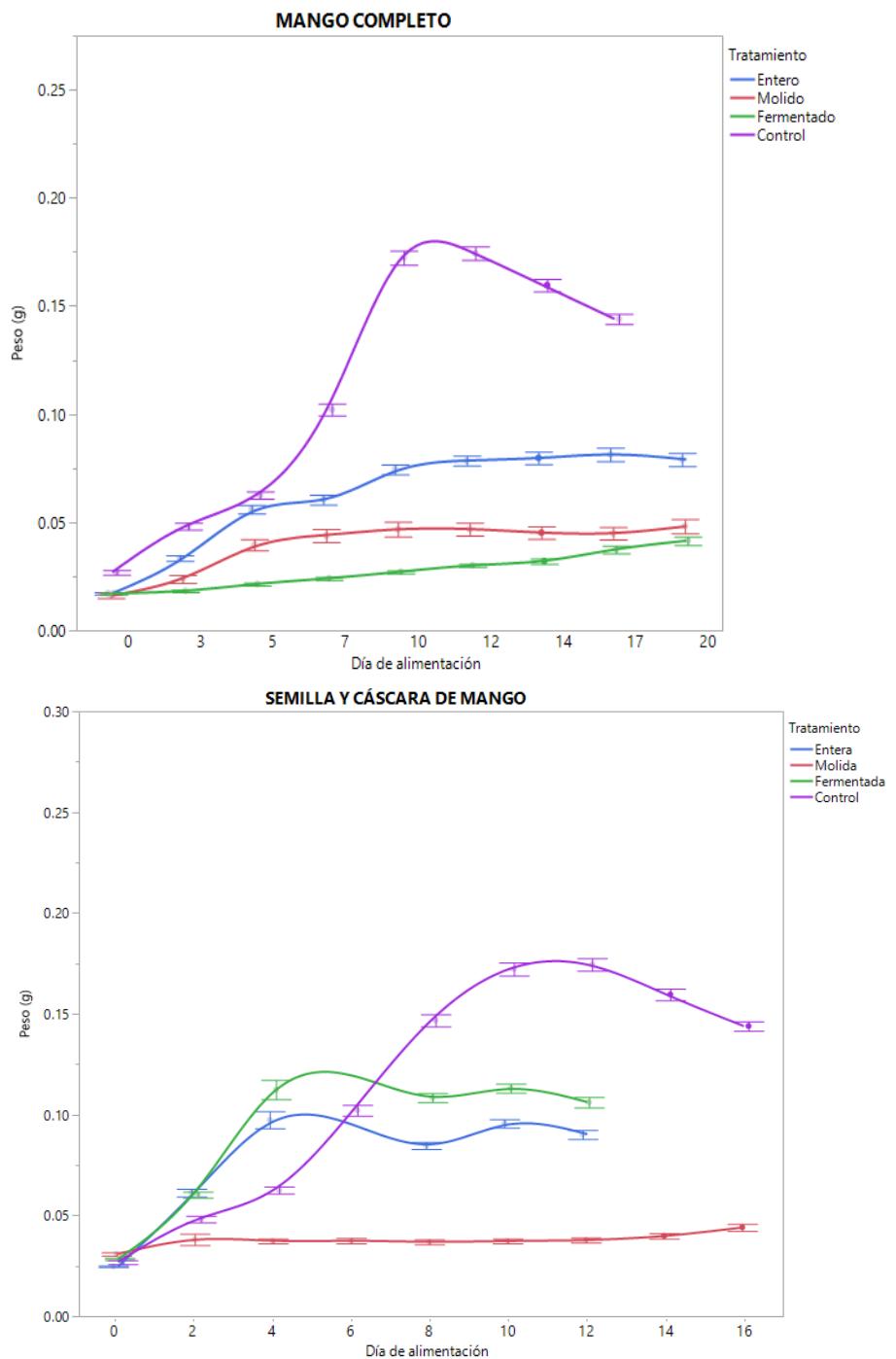


Figura 19. Curva de ganancia de peso con residuo de mango completo y semilla y cáscara de mango, con diferentes tratamientos (media \pm error estándar, n=30)

En las larvas alimentadas con bagazo de cerveza se observó un comportamiento similar a lo largo de la alimentación, siendo la ganancia de peso al principio mayor en los tres tratamientos que en el control. Sin embargo, las larvas del control mostraron un aumento de peso súbito para el día 10, sobrepasando a las larvas del tratamiento fermentado y logrando el mismo peso que las larvas del tratamiento molido, manteniéndose las larvas del bagazo entero por encima del control (Figura 20). Mientras que el comportamiento de las larvas en el residuo de tilapia fue similar al del control, alcanzando un mayor peso las del tratamiento entero (Figura 21).

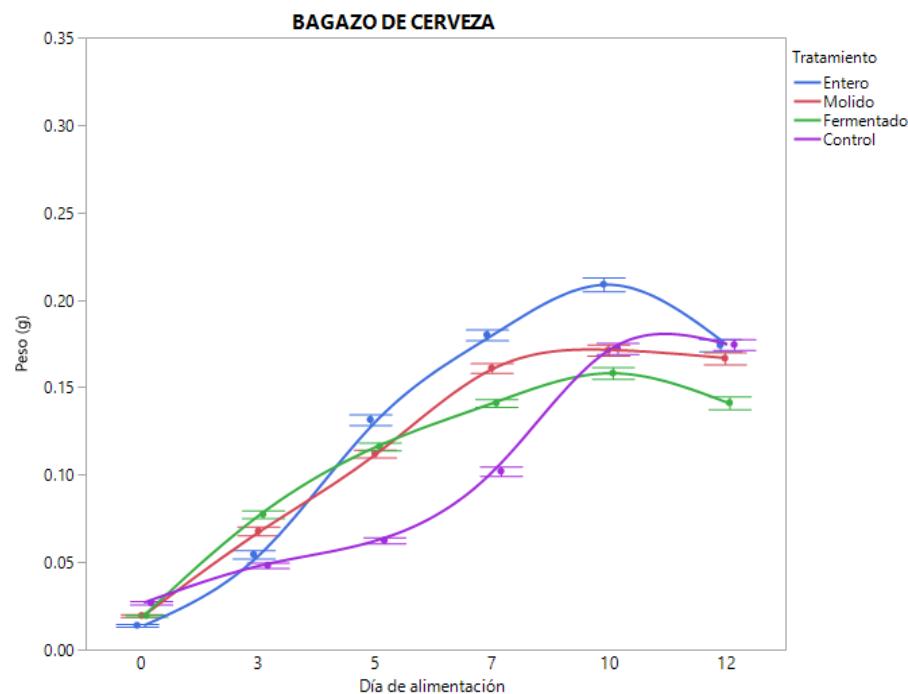


Figura 20. Curva de ganancia de peso con residuo de bagazo de cerveza, con diferentes tratamientos (media ± error estándar, n=30)

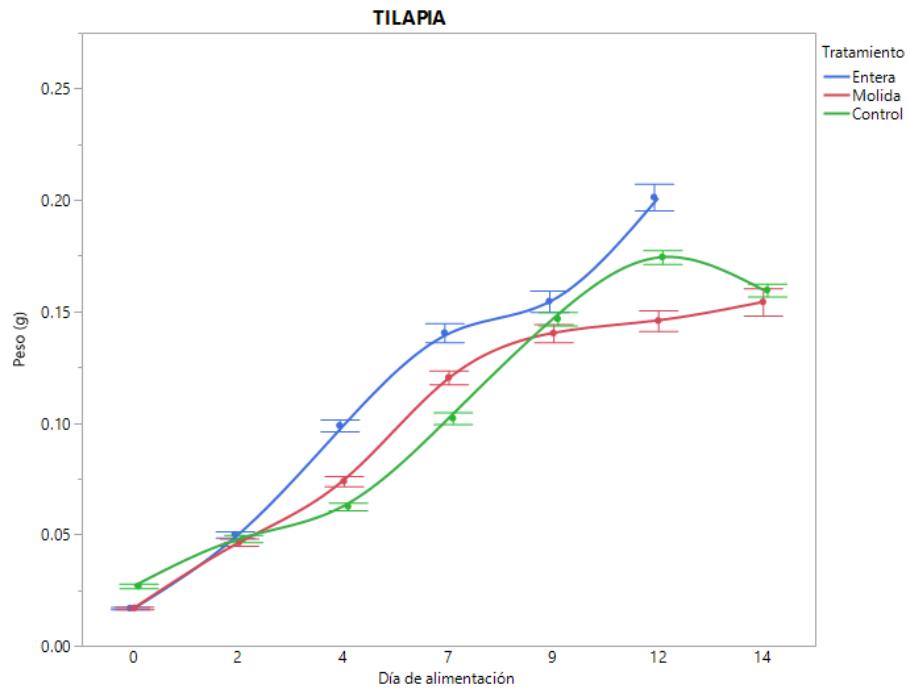


Figura 21. Curva de ganancia de peso con residuo de tilapia, con diferentes tratamientos (media \pm error estándar, n=30)

6.3.2 Análisis de variables productivas de la larva

En las figuras 22 y 23 se muestra el resultado del ANOVA y la prueba de Tukey-Kramer para cada residuo. En todos los residuos se encontró diferencias significativas entre los tratamientos. En el mango completo se observó diferencias entre todos los tratamientos, excepto entre fermentado y molido. En semilla y cáscara, en pulpa y en tilapia todos los tratamientos fueron diferentes. En bagazo de cerveza, el control y el tratamiento molido no mostraron diferencias significativas.

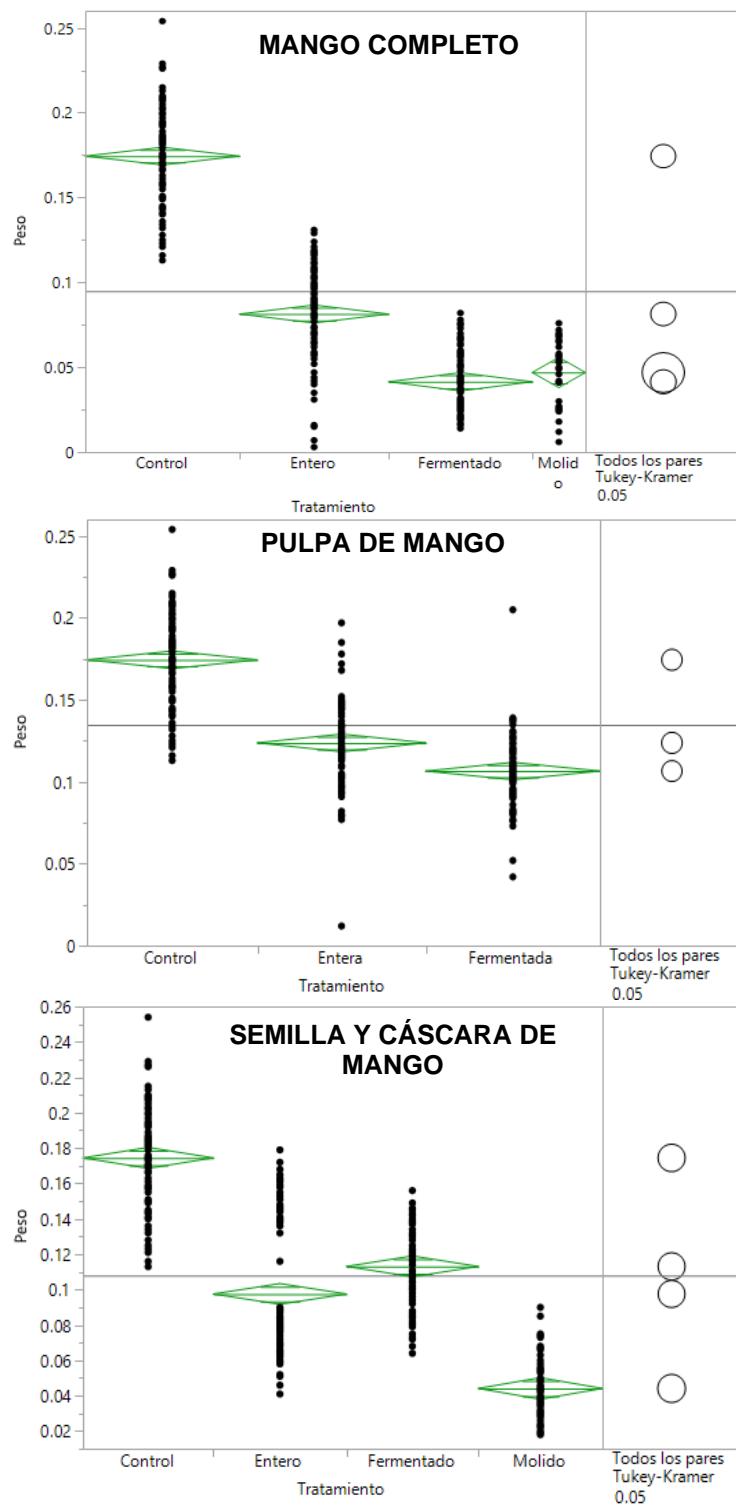


Figura 22. Prueba ANOVA y HDS de Tukey-Kramer realizada en software JMP 13.2. para peso máximo de larva obtenido de los diferentes pretratamientos para residuos de mango, n=30

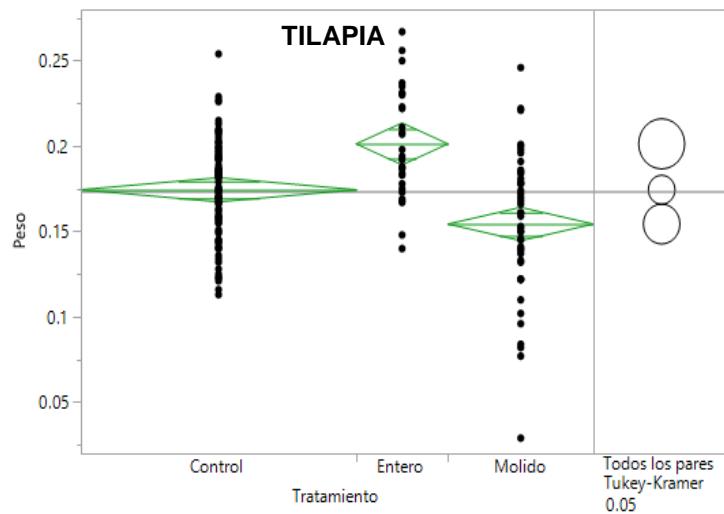
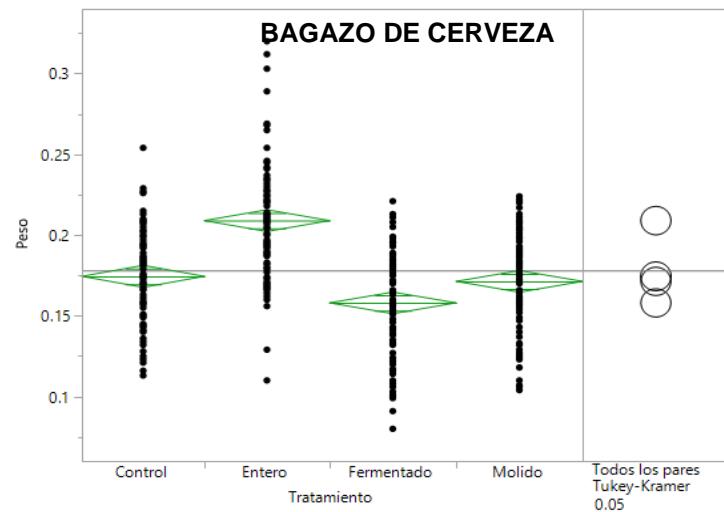


Figura 23. Prueba ANOVA y HDS de Tukey-Kramer realizada en software JMP 13.2. para peso máximo de larva obtenido de los diferentes pretratamientos para residuos de bagazo de cerveza y tilapia, n=30

En la figura 24, se observa la comparación de los residuos para cada pretratamiento. En el tratamiento entero, el bagazo de cerveza y la tilapia obtuvieron el peso más alto, por encima del control. De los residuos de mango, de mayor a menor peso fueron pulpa, semilla y cáscara, y por último el mango completo. De los residuos molidos, el bagazo de cerveza obtuvo el mayor peso, igual al del control, seguido de la tilapia, y por último con el mismo peso el mango completo y la semilla y cáscara de mango. Lo anterior puede ser adjudicado al porcentaje de proteína superior del bagazo y de la tilapia, sin embargo, el balance de carbono nitrógeno es mejor en el bagazo. Además, la tilapia contiene más grasa y menos fibra, lo cual podría provocar al ser molido que adquiera una consistencia poco atractiva para las larvas. Y en el tratamiento de fermentado, ningún residuo superó al control, pero, el peso más alto se obtuvo con el bagazo de cerveza, seguido por semilla y cáscara, y pulpa con el mismo peso.

La figura 25 muestra el resumen de comparación de ganancia de peso entre todos los pretratamientos para todos los residuos. La mayor ganancia de peso se observa en el bagazo de cerveza entero, seguido de la tilapia entera, el control, el bagazo de cerveza molido, el bagazo de cerveza fermentado, y la tilapia molida. Todos los tratamientos de mango tuvieron menores rendimientos. De estos el que mostró mayor ganancia de peso fue la pulpa seguido de la semilla y cáscara fermentada.

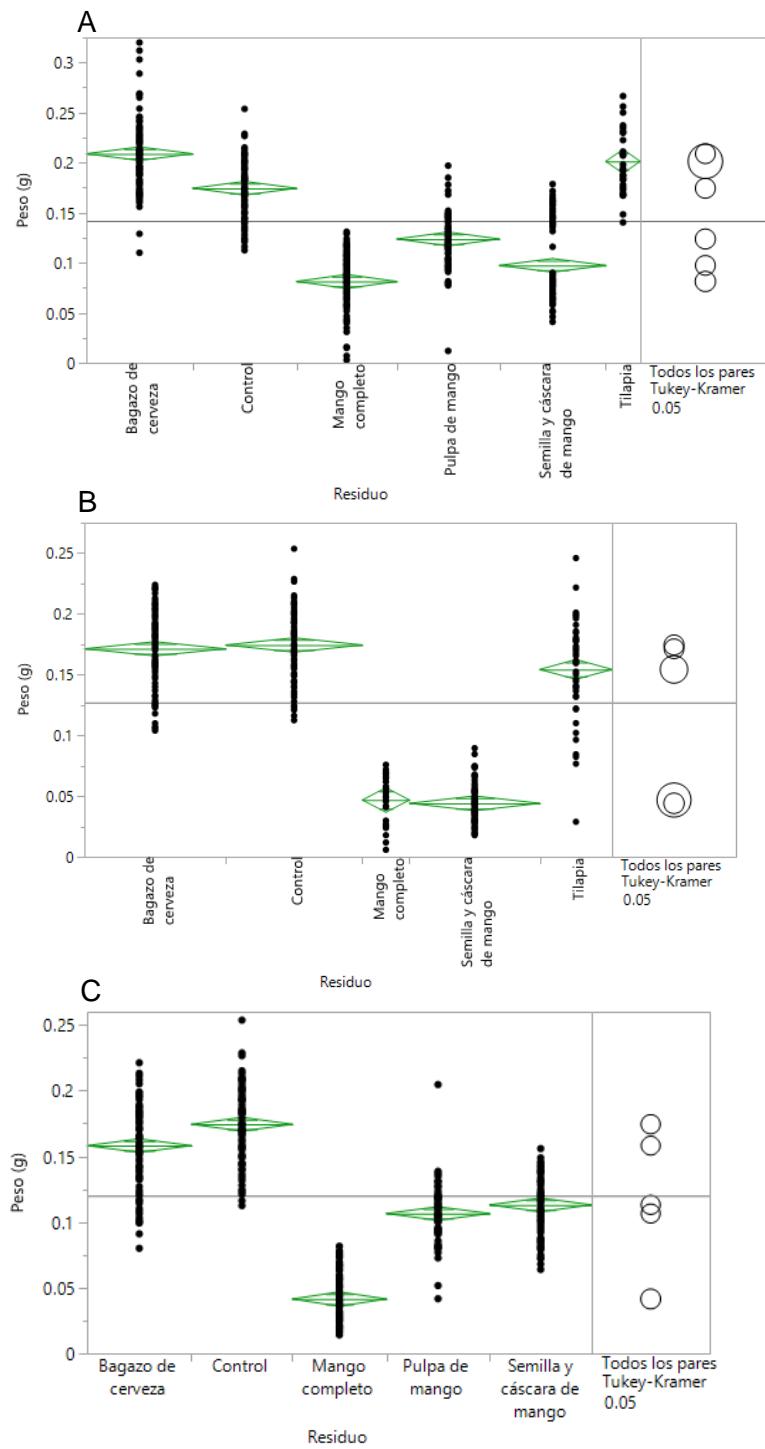


Figura 24. Prueba ANOVA y HDS de Tukey-Kramer realizada en software JMP 13.2. (A) Residuos enteros, (B) Residuos molidos, (C) Residuos fermentados, n=30

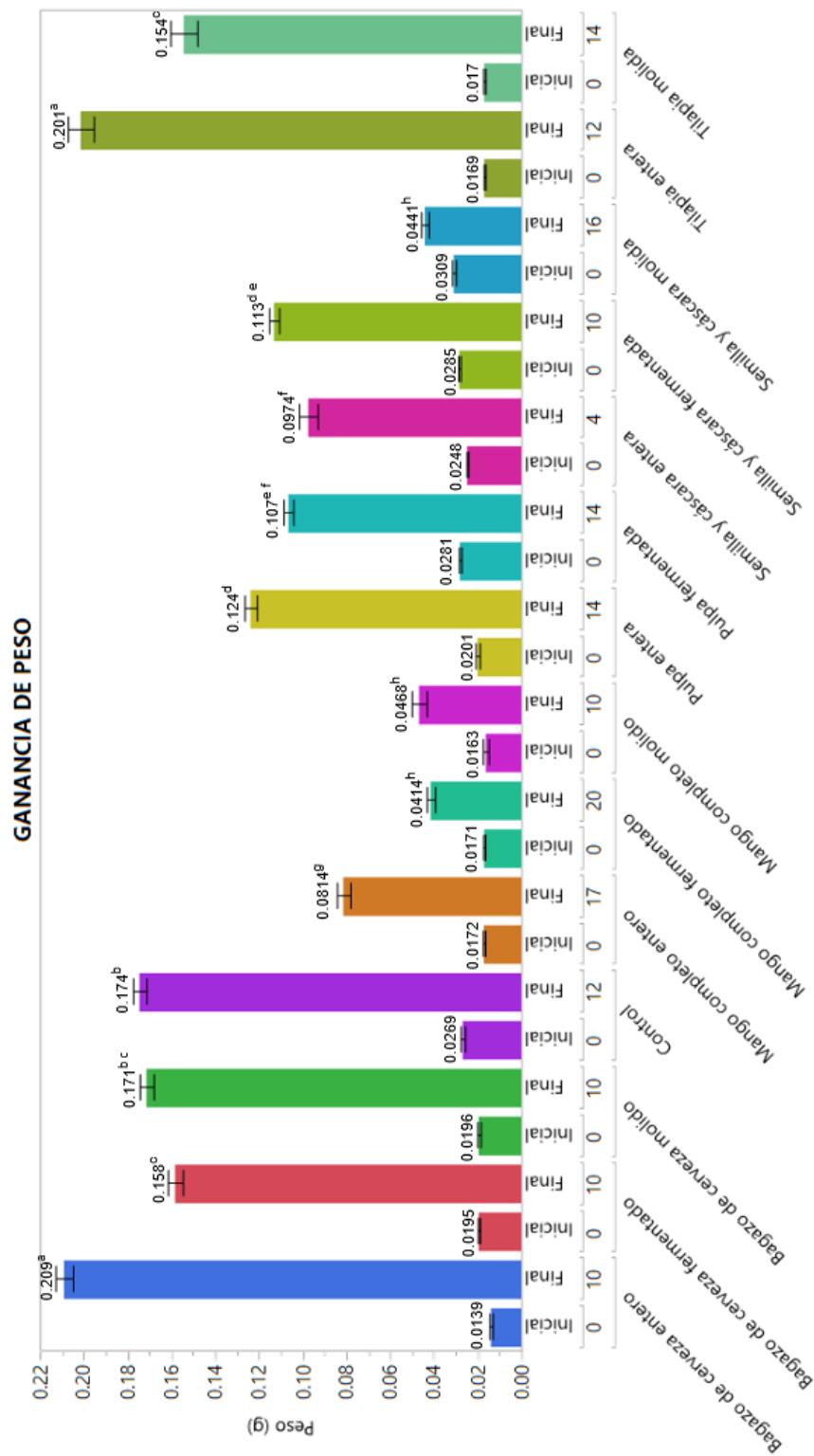


Figura 25. Ganancia de peso de las larvas comparando los diferentes residuos por tratamiento, se incluye comparación de medias para pesos finales (media ± error estándar, n=30)

Tratamiento / Día de alimentación/ Medición

En la tabla 5 se muestran las variables productivas medidas y calculadas de la alimentación de las larvas con los diferentes residuos pretratados. En todos los residuos el tratamiento entero tuvo mayor ganancia de peso y mejor eficiencia de conversión que el tratamiento molido. En el residuo de mango completo, y en el de semilla y cáscara de mango se sugiere que este comportamiento es debido a que al moler la semilla se liberan taninos que inhiben el crecimiento de la larva, por eso el mango completo entero a pesar de estar compuesto por una gran cantidad de pulpa no muestra un peso similar al de la pulpa sola. Mientras que, en el residuo de semilla, en el tratamiento entero las larvas crecen más por la pulpa que se queda, ya que la semilla y la cáscara se quedan casi intactas.

El residuo de bagazo de cerveza presentaba una consistencia pegajosa, y al molerlo se sugiere que causa una disminución de la aireación dentro del sustrato y mayor dificultad para la larva para moverse dentro del mismo. En el caso de la tilapia, al molerlo queda un sustrato muy acuoso que podría haber afectado respiración de las larvas dentro del mismo.

El único residuo donde el tratamiento de fermentación logró mejores resultados en cuanto a ganancia de peso y eficiencia de conversión fue en la semilla y cáscara. Este tratamiento aumentó en 256% el peso de las larvas comparado con la semilla molida, y en 235% la reducción del sustrato. En la pulpa y en el mango completo, se considera que por la cantidad de azúcares presentes pudo haber ocurrido producción de alcohol durante el proceso fermentativo, lo cual pudo haber inhibido el crecimiento.

La mayor reducción sustrato se obtuvo en pulpa tanto entera como fermentada, seguida de el mango completo entero y el bagazo de cerveza entero. En la semilla y cáscara de mango aumentó al doble la reducción del sustrato al fermentar el residuo.

Tabla 5. Variables productivas de la alimentación de las larvas con diferentes residuos orgánicos pretratados

Residuo	Tratamiento	Peso máximo (g)*	Día de alimentación con peso máximo	Conversión alimenticia (g/g)	Reducción del sustrato (%)	Mortalidad (%)
Control	-	0.174±0.003 ^b	12	13.55	40.65	3.33
Pulpa de mango	Entera	0.124±0.002 ^d	14	8.68	84.52	4.44
	Fermentado	0.107±0.002 ^{ef}	14	11.47	81.55	0.00
Mango completo	Entero	0.081±0.002 ^g	17	17.2	75.32	3.33
	Molido	0.047±0.004 ^h	10	35.83	61.02	0
	Fermentado	0.041±0.002 ^h	20	46.1	59.93	5.56
Semilla y cáscara de mango	Entera	0.097±0.002 ^f	4	21.18	25.55	0
	Molida	0.044±0.003 ^h	16	111.36	30.97	0
	Fermentado	0.113±0.003 ^{de}	10	17.94	60.22	0
Bagazo de cerveza	Entero	0.209±0.003 ^a	10	7.18	75.32	0
	Molido	0.171±0.003 ^{bc}	10	9.25	61.02	0
	Fermentado	0.158±0.003 ^c	10	10.12	59.93	0
Tilapia	Entera	0.201±0.006 ^a	12	6.8	64.11	37.77
	Molida	0.154±0.004 ^c	14	9.1	64.63	18.33

*Medias ± error estándar, n=30. Comparación de medias entre todos los tratamientos

7 CONCLUSIONES

La dosis de alimentación afecta la conversión alimenticia y el peso de las larvas. Al aumentar la dosis de alimentación incrementa el peso de las larvas, sin embargo, empeora la conversión alimenticia. A partir de esto, se puede decidir la dosis de alimento para las larvas con un enfoque de producción de biomasa o de tratamiento de residuos.

El pretratamiento de diferentes residuos orgánicos tiene un efecto en su biotransformación por la larva de mosca soldado negro, tanto en la ganancia de peso de la larva, como en su eficiencia de conversión y reducción del sustrato. El residuo que obtuvo el peso más alto en las larvas fue el bagazo de cerveza entero, que resultó incluso mayor que el del control de dieta Gainesville. En los residuos de mango completo, pulpa de mango, bagazo de cerveza y tilapia el tratamiento que obtuvo mayor peso fue el residuo entero. En el residuo de semilla y cáscara de mango, el peso de las larvas disminuyó más de la mitad al molerlo, mientras que el tratamiento fermentado logró un peso más alto que el residuo entero. En el anterior residuo fue en el único en el que el tratamiento de fermentado mostró pesos de larva más altos que el tratamiento de molido.

En cuanto a la conversión alimenticia y la reducción del sustrato, en todos los residuos, a excepción de la semilla y cáscara, estos factores empeoraron en los tratamientos de molido y fermentado. En el residuo de semilla se observó la mejor conversión alimenticia y reducción del sustrato en el tratamiento de fermentado. En los tratamientos se observó una baja o nula mortalidad, únicamente en la tilapia aumentó considerablemente.

Sería importante considerar para estudios posteriores la implementación de procesos de fermentado con inóculos específicos, y diferentes tiempos de fermentación. Además, se podrían evaluar otras variables productivas como la eficiencia del tamizaje al momento de la cosecha para el análisis del tratamiento de molienda, incluso probando distintos tamaños de partícula o residuos en diferentes estados de maduración.

8 REFERENCIAS

- Abdel-Rahman, M. A., Tashiro, Y., & Sonomoto, K. (2013). Recent advances in lactic acid production by microbial fermentation processes. *Biotechnology advances*, 31(6), 877-902. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.04.002>
- Addeo, N. F., Vozzo, S., Secci, G., Mastellone, V., Piccolo, G., Lombardi, P., ... & Bovera, F. (2021). Different Combinations of Butchery and Vegetable Wastes on Growth Performance, Chemical-Nutritional Characteristics and Oxidative Status of Black Soldier Fly Growing Larvae. *Animals*, 11(12), 3515. <https://doi.org/10.3390/ani11123515>
- Alam, P., & Ahmade, K. (2013). Impact of solid waste on health and the environment. *International Journal of Sustainable Development and Green Economics (IJSDGE)*, 2(1), 165-168. https://www.researchgate.net/publication/306150450_Impact_of_Solid_Waste_on_Health_and_The_Environment
- Ali, U., Sajid, N., Khalid, A., Riaz, L., Rabbani, M. M., Syed, J. H., & Malik, R. N. (2015). A review on vermicomposting of organic wastes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(4), 1050-1062. <https://doi.org/10.1002/ep.12100>
- Awasthi, S. K., Sarsaiya, S., Awasthi, M. K., Liu, T., Zhao, J., Kumar, S., & Zhang, Z. (2020). Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 299, 122555. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122555>
- Ayilara, M. S., Olanrewaju, O. S., Babalola, O. O., & Odeyemi, O. (2020). Waste management through composting: Challenges and potentials. *Sustainability*, 12(11), 4456. <https://doi.org/10.3390/su12114456>
- Banu, J. R., Merrylin, J., Usman, T. M., Kannah, R. Y., Gunasekaran, M., Kim, S. H., & Kumar, G. (2020). Impact of pretreatment on food waste for biohydrogen production: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(36), 18211-18225.
- Barbehenn, R. V., & Constabel, C. P. (2011). Tannins in plant-herbivore interactions. *Phytochemistry*, 72(13), 1551-1565.
- Bava, L., Jucker, C., Gislon, G., Lupi, D., Savoldelli, S., Zucali, M., & Colombini, S. (2019). Rearing of *Hermetia illucens* on different organic by-products: Influence

- on growth, waste reduction, and environmental impact. *Animals*, 9(6), 289. <https://doi.org/10.3390/ani9060289>
- Brits, D. (2017). *Improving feeding efficiencies of black soldier fly larvae, Hermetia illucens (L., 1758) (Diptera: Stratiomyidae: Hermetiinae) through manipulation of feeding conditions for industrial mass rearing* [Tesis doctoral, Stellenbosch University]. SUNScholar Research Repository. <https://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/100812>
- Bruno, D., Bonacci, T., Reguzzoni, M., Casartelli, M., Grimaldi, A., Tettamanti, G., & Brandmayr, P. (2020). An in-depth description of head morphology and mouthparts in larvae of the black soldier fly Hermetia illucens. *Arthropod Structure & Development*, 58, 100969. <https://doi.org/10.1016/j.asd.2020.100969>
- Cammack, J. A., & Tomberlin, J. K. (2017). The impact of diet protein and carbohydrate on select life-history traits of the black soldier fly Hermetia illucens (L.) (Diptera: Stratiomyidae). *Insects*, 8(2), 56. <https://doi.org/10.3390/insects8020056>
- Cappellozza, S., Leonardi, M. G., Savoldelli, S., Carminati, D., Rizzolo, A., Cortellino, G., ... & Tettamanti, G. (2019). A first attempt to produce proteins from insects by means of a circular economy. *Animals*, 9(5), 278. <https://doi.org/10.3390/ani9050278>
- CCA (2017). *Caracterización y gestión de la pérdida y el desperdicio de alimentos en América del Norte, informe sintético*. Comisión para la Cooperación Ambiental. <http://www.cec.org/files/documents/publications/11772-characterization-and-management-food-loss-and-waste-in-north-america-es.pdf>
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. (16 de octubre del 2020). *¿Cuánta comida se desperdicia en el mundo y cómo afecta al planeta?*. [#home](http://www.cedrssa.gob.mx/post_cunonta_n-comida-n_se_n-desperdicia-n_en_el_n-mundo_n-y_cnimo_n-afecta-n_al_n-planeta-n.htm)
- Chen, T., Zhang, S., & Yuan, Z. (2020). Adoption of solid organic waste composting products: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122712. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122712>
- Cheng, J. Y. K., Chiu, S. L. H., & Lo, I. M. C. (2017). Effects of moisture content of

- food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion. *Waste Management*, 67, 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.046>
- Cho, I. Y., & Anderson, C. W. (2006). Understanding of matter transformation in physical and chemical changes: Ecological thinking. *National Association for Research in Science Teaching*. <https://envlit.educ.msu.edu/publicsite/files/CarbonCycle/CC%20ResearchPaper/CC%20ChoPhyChem.pdf>
- Cortés, E., Álvarez, F., & González, H. (2009). La mecanización agrícola: gestión, selección y administración de la maquinaria para las operaciones de campo. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 4(2), 151-160. <https://revistas.ces.edu.co/index.php/mvz/article/view/1040>
- Cruz, L. J. E., Silvera, G. S., & Martínez, A. E. (2022). La semilla del mango (Mangifera indica L.): Caracterización química y uso en la alimentación animal (Revisión). *Redel. Revista Granmense de Desarrollo Local*, 6(2), 35-54.
- De Smet, J., Wynants, E., Cos, P., & Van Campenhout, L. (2018). Microbial community dynamics during rearing of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) and impact on exploitation potential. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(9).
- Dortmans, B.; Diener, S.; Verstappen, B.M.; Zurbrügg, C. (2017). *Black soldier fly biowaste processing - a step-by-step guide*. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/BSF/BSF_Biowaste_Processing_LR.pdf
- El-Hack, A., Mohamed, E., Shafi, M. E., Alghamdi, W. Y., Abdelnour, S. A., Shehata, A. M., ... & Ragni, M. (2020). Black soldier fly (*Hermetia illucens*) Meal as a promising feed ingredient for poultry: A comprehensive review. *Agriculture*, 10(8), 339. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080339>
- FAO (2011). Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention. <https://www.fao.org/3/mb060e/mb060e.pdf>
- Fan, L., & Hansen, L. T. (2012). *Fermentation and biopreservation of plant-based foods with lactic acid bacteria*. Handbook of Plantbased Fermented Food and

- Beverage Technology. CRC Press, 35-48.
<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b12055-7/fermentation-biopreservation-plant-based-foods-lactic-acid-bacteria-lihua-fan-lisbeth-truelstrup-hansen>
- Gao, Z., Wang, W., Lu, X., Zhu, F., Liu, W., Wang, X., & Lei, C. (2019). Bioconversion performance and life table of black soldier fly (*Hermetia illucens*) on fermented maize straw. *Journal of cleaner production*, 230, 974-980.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.074>
- Garay Tinoco, J. A., Pinilla González, C. A., & Díaz Merlano, J. M. (2003). *Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos)*. Instituto de Investigaciones Marina y Costeras José Benito Vives De Andréis.
<http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/7010manualTecnicasanaliticas..pdf>
- Ghinea, C., & Leahu, A. (2020). Monitoring of fruit and vegetable waste composting process: relationship between microorganisms and physico-chemical parameters. *Processes*, 8(3), 302. <https://doi.org/10.3390/pr8030302>
- Gobbi, P., Martinez-Sanchez, A., & Rojo, S. (2013). The effects of larval diet on adult life-history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). European Journal of Entomology, 110(3), 461.
<http://www.eje.cz/pdfs/110/3/461>
- Gold, M., Tomberlin, J. K., Diener, S., Zurbrügg, C., & Mathys, A. (2018). Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review. *Waste Management*, 82, 302-318.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.022>
- Hernández-Lara, A., Ros, M., Cuartero, J., Bustamante, M. Á., Moral, R., Andreu-Rodríguez, F. J., ... & Pascual, J. A. (2022). Bacterial and fungal community dynamics during different stages of agro-industrial waste composting and its relationship with compost suppressiveness. *Science Of The Total Environment*, 805, 150330. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150330>
- Holmes, L. A., Vanlaerhoven, S. L., & Tomberlin, J. K. (2013). Substrate effects on pupation and adult emergence of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental entomology*, 42(2), 370-374.

<https://doi.org/10.1603/EN12255>

- Isibika, A., Vinnerås, B., Kibazohi, O., Zurbrügg, C., & Lalander, C. (2019). Pre-treatment of banana peel to improve composting by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae. *Waste Management*, 100, 151-160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.017>
- Isibika, A., Vinnerås, B., Kibazohi, O., Zurbrügg, C., & Lalander, C. (2021). Co-composting of banana peel and orange peel waste with fish waste to improve conversion by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128570. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128570>
- Iturbe Chiñas, A. F., & Sandoval Guillén, B. J. (2011). *Análisis de alimentos: fundamentos y técnicas*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/14545/mod_resource/content/1/An%C3%A1lisis%20de%20alimentos%20fundamentos%20y%20t%C3%A9cnicas.pdf
- Joly, G., Nikiema, J., (2019). Global experiences on waste processing with black soldier fly (*Hermetia illucens*): from technology to business. *Resource Recovery and Reuse Series* 16. <https://hdl.handle.net/10568/105751>
- Jördenin, H., Winter, J. 2005. *Environmental Biotechnology. Concepts and Applications*. WILEY-VCH VerlagGmbH. <https://books.google.com.ec/books?id=-P1qZN2XBbEC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Jucker, C., Erba, D., Leonardi, M. G., Lupi, D., & Savoldelli, S. (2017). Assessment of vegetable and fruit substrates as potential rearing media for *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *Environmental entomology*, 46(6), 1415-1423. <https://doi.org/10.1093/ee/nvx154>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Kim, W., Bae, S., Park, K., Lee, S., Choi, Y., Han, S., & Koh, Y. (2011). Biochemical characterization of digestive enzymes in the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 14(1), 11-14. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2010.11.003>

- Lalander, C.; Diener, S.; Zurbrügg, C.; Vinnerås, B. 2019. Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*). *Journal of Cleaner Production* 208: 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.017>
- Lalander, C., Ermolaev, E., Wiklicky, V., & Vinnerås, B. (2020). Process efficiency and ventilation requirement in black soldier fly larvae composting of substrates with high water content. *The Science of the total environment*, 729, 138968. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138968>
- Langemeier, M. (30 de junio de 2021) *International Benchmarks For Soybean Production (2021)*. Purdue University Center for Commercial Agriculture. <https://ag.purdue.edu/commercialag/home/resource/2021/06/international-benchmarks-for-soybean-production-2021/>
- Law, Y., & Wein, L. (2018). Reversing the nutrient drain through urban insect farming—Opportunities and challenges. *AIMS Bioengineering*, 5(4), 226-237. DOI:10.3934/bioeng.2018.4.226
- Li, W., Li, Q., Zheng, L., Wang, Y., Zhang, J., Yu, Z., & Zhang, Y. (2015). Potential biodiesel and biogas production from corncob by anaerobic fermentation and black soldier fly. *Bioresource technology*, 194, 276-282. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.112>
- Lohri, C.R.; Diener, S.; Zabaleta, I.; Mertenat, A.; Zurbrügg, C. 2017. Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products: A review with focus on low- and middle-income settings. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 16: 81-130. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9422-5>
- Ma, J., Lei, Y., Rehman, K. U., Yu, Z., Zhang, J., Li, W., Li, Q., Tomberlin, J. K., & Zheng, L. (2018). Dynamic Effects of Initial pH of Substrate on Biological Growth and Metamorphosis of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental entomology*, 47(1), 159–165. <https://doi.org/10.1093/ee/nvx186>
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. McGraw Hill. <http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusgp/14698.pdf>
- Maina, S., Kachrimanidou, V., & Koutinas, A. (2017). A roadmap towards a circular and sustainable bioeconomy through waste valorization. *Current Opinion in*

- Martínez, E., & Lira, L. (2010). Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos. *Simposio de metrología*, 27-29 <https://cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>.
- Marzo, C., Díaz, A. B., Caro, I., & Blandino, A. (2019). Valorization of agro-industrial wastes to produce hydrolytic enzymes by fungal solid-state fermentation. *Waste Management & Research*, 37(2), 149-156. <https://doi.org/10.1177/0734242X18798699>
- Maurya, D. K., Kumar, A., Chaurasiya, U., Hussain, T., & Singh, S. K. (2021). Modern era of microbial biotechnology: opportunities and future prospects. *Microbiomes and Plant Health*, 317–343. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819715-8.00011-2>
- Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. *International journal of environmental research and public health*, 15(10), 2224. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- Meneguz M, Gasco L, Tomberlin JK (2018a) Impact of pH and feeding system on black soldier fly (*Hermetia illucens*, L; Diptera: Stratiomyidae) larval development. *PLoS ONE* 13(8): e0202591. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202591>
- Meneguz, M., Schiavone, A., Gai, F., Dama, A., Lussiana, C., Renna, M. and Gasco, L. (2018b), Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *J. Sci. Food Agric*, 98: 5776-5784. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9127>
- Menino, R., Felizes, F., Castelo-Branco, M. A., Fareleira, P., Moreira, O., Nunes, R., & Murta, D. (2021). Agricultural value of Black Soldier Fly larvae frass as organic fertilizer on ryegrass. *Helijon*, 7(1), e05855. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05855>
- Miezah, K., Obiri-Danso, K., Kádár, Z., Fei-Baffoe, B., & Mensah, M. Y. (2015). Municipal solid waste characterization and quantification as a measure towards effective waste management in Ghana. *Waste management*, 46, 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.009>

- Mohd-Noor, S. N., Wong, C. Y., Lim, J. W., Uemura, Y., Lam, M. K., Ramli, A., ... & Tham, L. (2017). Optimization of self-fermented period of waste coconut endosperm destined to feed black soldier fly larvae in enhancing the lipid and protein yields. *Renewable Energy*, 111, 646-654. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.067>
- Morales Quintana, J. F. (2021). *Bioconversión de residuos orgánicos a partir del manejo ex situ de Hermetia illucens (L., 1758) (Diptera: Stratiomyidae) como una alternativa para la gestión sostenible de los desechos sólidos en el Distrito Metropolitano de Quito* [Tesis de licenciatura, Universidad Central de Ecuador]. Repositorio Digital UCE
- Mushtaq, M. (2018). Extraction of Fruit Juice. *Fruit Juices*, 131–159. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802230-6.00008-4>
- Nair, R. B., & Taherzadeh, M. J. (2016). Valorization of sugar-to-ethanol process waste vinasse: a novel biorefinery approach using edible ascomycetes filamentous fungi. *Bioresource Technology*, 221, 469-476. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.074>
- Naviglio, D., Scarano, P., Ciaravolo, M., & Gallo, M. (2019). Rapid Solid-Liquid Dynamic Extraction (RSLDE): A powerful and greener alternative to the latest solid-liquid extraction techniques. *Foods*, 8(7), 245. <https://doi.org/10.3390/foods8070245>
- Nayak, A., & Bhushan, B. (2019). An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. *Journal of Environmental Management*, 233, 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.041>
- Nguyen, T. T., Tomberlin, J. K., & Vanlaerhoven, S. (2013). Influence of resources on Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae) larval development. *Journal of Medical Entomology*, 50(4), 898-906.
- Parra Paz, A.S., Carrejo, N.S. & Gómez Rodríguez, C.H. (2015). Effects of Larval Density and Feeding Rates on the Bioconversion of Vegetable Waste Using Black Soldier Fly Larvae Hermetia illucens (L.), (Diptera: Stratiomyidae). *Waste Biomass Valor* 6, 1059–1065. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9418-8>
- Ricci-Jürgensen, M., Gilbert, J., & Ramola, A. (2020). Global Assessment of municipal organic waste production and recycling. *ISWA*, 1, 1-32. <https://www.altereko.it/wp-content/uploads/2020/03/Report-1-Global-68>

Assessment-of-Municipal-Organic-Waste.pdf

Ross, R. P., Morgan, S., & Hill, C. (2002). Preservation and fermentation: past, present and future. *International journal of food microbiology*, 79(1-2), 3-16. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00174-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00174-5)

Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M., & Lobo, M. G. (2018). *Fruit and Vegetable Waste: Bioactive Compounds, Their Extraction, and Possible Utilization. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(3), 512–531. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>

Salgado, C. L., Muñoz, R., Blanco, A., & Lienqueo, M. E. (2021). Valorization and upgrading of the nutritional value of seaweed and seaweed waste using the marine fungi *Paradendryphiella salina* to produce mycoprotein. *Algal Research*, 53, 102135. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102135>

Salomone, R., Saija, G., Mondello, G., Giannetto, A., Fasulo, S., & Savastano, D. (2017). Environmental impact of food waste bioconversion by insects: application of life cycle assessment to process using *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Production*, 140, 890-905. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.154>

Sánchez, E. P., Núñez, D., Cruz, R. O., Torres, M. A., & Herrera, E. V. (2017). Simulación y conteo de unidades formadoras de colonias. *ReCIBE. Revista electrónica de Computación, Informática, Biomédica y Electrónica*, 6(1), 97-111. : <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=512253717006>

Scala, A., Cammack, J. A., Salvia, R., Scieuzzo, C., Franco, A., Bufo, S. A., ... & Falabella, P. (2020). Rearing substrate impacts growth and macronutrient composition of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale. *Scientific reports*, 10(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76571-8>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2 de mayo de 2021). *Prevé Agricultura 290.7 millones de toneladas de producción agrícola, pecuaria, acuícola y pesquera en 2021*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/preve-agricultura-290-7-millones-de-toneladas-de-produccion-agricola-pecuaria-y-pesquera-en-2021?idiom=es>

SEMARNAP (1996). Programa para la minimización y manejo integral de residuos industriales peligrosos en México 1996-2000. *Secretaría de Medio Ambiente*, 69

- Recursos Naturales y Pesca/Instituto Nacional de Ecología.
http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/prog_mini_mex_96_00.pdf
- Sharma, H. K., Xu, C., & Qin, W. (2019). Biological pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuels and bioproducts: an overview. *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), 235-251. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0059-y>
- Silva, M. E., Torres Neto, A. B., Silva, W. B., Silva, F. L. H., & Swarnakar, R. (2007). Cashew wine vinegar production: alcoholic and acetic fermentation. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 24(2), 163-169. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322007000200001>
- Spreer, W., & Müller, J. (2011). Estimating the mass of mango fruit (*Mangifera indica*, cv. Chok Anan) from its geometric dimensions by optical measurement. *Computers and electronics in agriculture*, 75(1), 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.10.007>
- Srisowmeya, G., Chakravarthy, M., & Devi, G. N. (2020). Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109587. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587>
- Sun, W., Shahrajabian, M. H., & Lin, M. (2022). Research progress of fermented functional foods and protein factory-microbial fermentation technology. *Fermentation*, 8(12), 688. <https://doi.org/10.3390/fermentation8120688>
- Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L.-H. L., & Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>
- Svensson, S. E., Bucuricova, L., Ferreira, J. A., Souza Filho, P. F., Taherzadeh, M. J., & Zamani, A. (2021). Valorization of bread waste to a fiber-and protein-rich fungal biomass. *Fermentation*, 7(2), 91. <https://doi.org/10.3390/fermentation7020091>
- The World Bank (11 de febrero de 2022). *Solid Waste Management*. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>
- Toledo, M., Siles, J. A., Gutiérrez, M. C., & Martín, M. A. (2018). Monitoring of the

- composting process of different agroindustrial waste: Influence of the operational variables on the odorous impact. *Waste Management*, 76, 266-274. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.042>
- Troiano, D., Orsat, V., & Dumont, M. J. (2020). Status of filamentous fungi in integrated biorefineries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109472. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109472>
- Van Campenhout, L. (2021). Fermentation technology applied in the insect value chain: making a win-win between microbes and insects. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(4), 377-381. <https://doi.org/10.3920/JIFF2021.x006>
- Wang, Y. S., & Shelomi, M. (2017). Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food. *Foods*, 6(10), 91. <https://doi.org/10.3390/foods6100091>
- Wong, C. Y., Lim, J. W., Chong, F. K., Lam, M. K., Uemura, Y., Tan, W. N., ... & Lam, S. S. (2020). Valorization of exo-microbial fermented coconut endosperm waste by black soldier fly larvae for simultaneous biodiesel and protein productions. *Environmental research*, 185, 109458. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109458>
- Xiang, H., Sun-Waterhouse, D., Waterhouse, G. I., Cui, C., & Ruan, Z. (2019). Fermentation-enabled wellness foods: A fresh perspective. *Food Science and Human Wellness*, 8(3), 203-243. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.08.003>
- Yu, G., Cheng, P., Chen, Y., Li, Y., Yang, Z., Chen, Y., & Tomberlin, J. K. (2011). Inoculating poultry manure with companion bacteria influences growth and development of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *Environmental entomology*, 40(1), 30-35. <https://doi.org/10.1603/EN10126>
- Yugsi Lita, J. Y. (2017). *Estudio comparativo de los métodos fenol-ácido sulfúrico y antrona para determinar la pureza de dos almidones, usando muestras de almidón de maíz (Zea mays) y papa (Solanum tuberosum)* [Tesis de licenciatura, Universidad San Francisco de Quito]. Repositorio Digital de la Universidad San Francisco de Quito
- Zamora, F. (2009). Biochemistry of alcoholic fermentation. En M. Victoria Moreno-Arribas & M. Carmen Polo (Eds.), *Wine chemistry and biochemistry* (pp. 3-26). Springer.
- Zhang, J. B., Tomberlin, J. K., Cai, M. M., Xiao, X. P., Zheng, L. Y., & Yu, Z. N. (2020).

- Research and industrialisation of *Hermetia illucens* L. in China. *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(1), 5-12. <https://doi.org/10.3920/JIFF2019.0020>
- Zhang, C., Yang, H., Yang, F., & Ma, Y. (2009). Current progress on butyric acid production by fermentation. *Current microbiology*, 59(6), 656-663. <https://doi.org/10.1007/s00284-009-9491-y>
- Zheng, L., Hou, Y., Li, W., Yang, S., Li, Q., & Yu, Z. (2012). Biodiesel production from rice straw and restaurant waste employing black soldier fly assisted by microbes. *Energy*, 47(1), 225-229. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.006>