

EVALUACIÓN DEL CONTENIDO PROTEICO DE LAS LARVAS DE MOSCA SOLDADO
NEGRO (*Hermetia Illucens Sp.*) DURANTE EL PROCESO DE DEGRADACIÓN DE
BIORRESIDUOS

MARÍA CAMILA ACOSTA HERNÁNDEZ
VALENTINA GUZMÁN MUÑETÓN

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
FELIPE CORREA MAHECHA
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTA D.C

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, D.C., octubre 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones.

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Vicerrector Académico y Financiero.

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General.

Dr. JOSÉ LUIS MACÍAS RODRÍGUEZ

Decano Facultad de Ingenierías.

Ing. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO

Director Programa de Ingeniería Química.

Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

DEDICATORIA

En dedicación a mis padres por ser mi apoyo incondicional y la razón de mi motivación, por darme la fortaleza para continuar cuando el camino se ponía difícil, por creer en mí y motivarme cada día a ser mejor persona, sin ellos nada de esto sería posible. A mi hermana por su comprensión y apoyo y por enseñarme a luchar por mis sueños y a mi abuelita por brindarme su amor en todo momento.

A mis amigas que me han acompañado en este largo proceso, por siempre estar para mí y brindarme una sonrisa cuando los tiempos eran difíciles, a mi compañera de tesis Camila Acosta que ha sido parte fundamental, por siempre escucharme y brindarme su apoyo y amistad incondicional.

Valentina Guzmán Muñetón

Dedico este proyecto con todo el amor de mundo a mi mamá por siempre creer en mí, por apoyarme y darme el mayor ejemplo de que todo lo que nos proponemos es posible, a mi abuela que gracias a ella me he convertido en la mujer que soy hoy en día y siempre tuvo palabras de alivio cuando las necesité, a mi papá por darme su apoyo incondicional en todo momento y a mi familia que estuvo presente en mi proceso dándome los mejores consejos. A mi tía Cecilia que, aunque ya no está conmigo me dejó grandes enseñanzas y desde el cielo me protege y celebra mis triunfos.

A mis amigas que siempre me brindaron su amistad incondicional y fueron parte fundamental en este proceso, sin ellas nada de esto habría sido posible, a mi novio que siempre estuvo dispuesto a escucharme, apoyarme y sacarme una sonrisa y principalmente a mi compañera de tesis Valentina Guzmán porque gracias a su compromiso, lealtad, comprensión y amistad sincera logramos culminar esta etapa juntas.

María Camila Acosta Hernández

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por permitirnos llegar hasta este punto, a nuestras familias por su apoyo incondicional, por su amor, dedicación y compañía durante todo este proceso, por siempre darnos las fuerzas para seguir adelante y no rendirnos, por siempre creer en nosotras y en nuestras habilidades y por siempre motivarnos a luchar por nuestros sueños.

Agradecemos a cada uno de nuestros compañeros que estuvieron presentes a lo largo de la carrera, brindándonos lo mejor de ellos, a nuestras amigas Luisa, Erika, Danna y Paula por su amistad incondicional y por todos los maravillosos momentos que compartimos juntas.

De igual forma agradecemos a nuestro director de trabajo de grado, Felipe Correa Mahecha, por su apoyo y motivación, por guiarnos y brindarnos sus conocimientos para finalizar con éxito esta investigación.

Agradecemos al Tecnoparque del SENA por brindarnos la oportunidad y el espacio para poder desarrollar nuestra idea, así mismo agradecemos a Ana, Diego y José, profesionales del SENA, por guiarnos y ofrecernos su ayuda ante cualquier inconveniente.

Finalmente queremos agradecer a la Universidad de América y sus docentes por prepararnos y permitirnos alcanzar este logro, inculcándonos valores indispensables para ser grandes profesionales.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

| | pág. |
|--|-------------|
| RESUMEN | 14 |
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| OBJETIVOS | 17 |
| 1. BIORRESIDUOS Y SUS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO | 18 |
| 1.1 Tecnologías de tratamiento de biorresiduos | 23 |
| 1.1.1 Compostaje | 23 |
| 1.1.2 Vermicompostaje | 24 |
| 1.1.3 Digestión Anaerobia | 24 |
| 1.1.4 Pirolisis lenta | 25 |
| 1.2 Uso de insectos en el tratamiento de biorresiduos | 28 |
| 2. EL MOCHUELO BAJO Y SUS RESIDUOS | 40 |
| 2.1 Residuos del mochuelo bajo | 41 |
| 2.2 Condiciones climáticas del mochuelo bajo | 46 |
| 2.3 Selección condiciones de operación y biorreactor | 50 |
| 2.4 Biorreactor | 51 |
| 3. CARACTERIZACIÓN DE SUSTRATO | 56 |
| 3.1 Residuos frescos | 59 |
| 3.2 Residuos cocidos | 64 |
| 3.3 Residuos cárnicos | 65 |
| 3.4 Residuos de poda y césped | 66 |
| 4. PROTEÍNA DE LARVA DE MOSCA SOLDADO NEGRO | 69 |
| 4.1 Metodología | 73 |
| 4.2 Resultados y análisis | 88 |
| 4.2.1 Estabilidad de las condiciones de operación del reactor y su influencia en el desarrollo larval. | 88 |
| 4.2.2 Comportamiento de las variables del sustrato durante el periodo de biodegradación larvaria | 90 |
| 4.2.3 Influencia de la dieta en la talla de las larvas | 95 |
| 4.2.4 Composición nutricional de las larvas de mosca soldado negro | 106 |
| 4.2.5 Indicadores de biotransformación del proceso de biodegradación con MSN | 111 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.2.6 | <i>Balance de materia para los sustratos usados en el proceso de degradación larvaria</i> | 119 |
| 5. | CONCLUSIONES | 130 |
| | BIBLIOGRAFIA | 132 |
| | ANEXOS | 139 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|------|
| Figura 1. Clasificación de los biorresiduos | 19 |
| Figura 2. Pérdidas y desperdicio de alimentos en América Latina y el Caribe por etapa de la cadena alimentaria | 20 |
| Figura 3. Impactos de acumulación de biorresiduos y consecuencia | 22 |
| Figura 4. Tecnologías de tratamiento de biorresiduos | 26 |
| Figura 5. Ciclo de vida de <i>Hermetia Illucens Sp</i> | 34 |
| Figura 6. Insectos usados en la biodegradación de residuos orgánicos | 38 |
| Figura 7. Planta piloto de tratamiento de residuos sólidos orgánicos | 42 |
| Figura 8. Hileras de compostaje de biorresiduos | 43 |
| Figura 9. Recolección de biorresiduos dentro de la planta de tratamiento de residuos orgánicos | 44 |
| Figura 10. Primera etapa de proceso de cuarteo para la recolección de residuos | 44 |
| Figura 11. Segunda etapa de proceso de cuarteo para la recolección de residuos | 45 |
| Figura 12. Pesaje final de residuos orgánicos seleccionados | 45 |
| Figura 13. Variación anual de la temperatura en la zona de Mochuelo Bajo | 47 |
| Figura 14. Variación mensual de la humedad relativa en la zona de Mochuelo Bajo | 48 |
| Figura 15. Revisión bibliográfica de la temperatura óptima para el desarrollo larval | 50 |
| Figura 16. Revisión bibliográfica del porcentaje óptimo de humedad relativa para el desarrollo larval | 51 |
| Figura 17. Recipiente empleado como bandeja para el desarrollo larval | 52 |
| Figura 18. Implementos externos del biorreactor | 53 |
| Figura 19. Implementos internos del biorreactor | 54 |
| Figura 20. Variables establecidas para el proceso de degradación de biorresiduos en el interior del biorreactor | 55 |
| Figura 21. Revisión bibliográfica de los diferentes tipos de sustratos usados para la alimentación larval | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 22. Origen y composición de los sustratos usados en el proceso de degradación de biorresiduos con MSN | 58 |
| Figura 23. Revisión bibliográfica del contenido de humedad del sustrato usado para la alimentación de las larvas de MSN | 59 |
| Figura 24. Composición de los residuos frescos obtenidos de la planta de tratamiento de residuos orgánicos en El Mochuelo Bajo | 60 |
| Figura 25. Deshidratación pasiva de residuos | 61 |
| Figura 26. Composición y propiedades de los residuos cocidos | 64 |
| Figura 27. Composición de biorresiduos de mezcla de vegetales y frutas | 70 |
| Figura 28. Composición de biorresiduos de restaurantes | 71 |
| Figura 29. Revisión bibliográfica de la densidad larval usada en diferentes ensayos | 72 |
| Figura 30. Larvas iniciales | 74 |
| Figura 31. Alimento inicial de las larvas | 75 |
| Figura 32. Sustratos al inicio del proceso de biodegradación | 76 |
| Figura 33. Bandeja usada con el sustrato | 76 |
| Figura 34. Biorreactor y estructura interna | 77 |
| Figura 35. Cronograma para toma de muestras y mediciones | 77 |
| Figura 36. Medición de larvas | 78 |
| Figura 37. Pesaje de las larvas | 79 |
| Figura 38. Seguimiento fotográfico de las larvas durante el proceso de biodegradación de residuos | 80 |
| Figura 39. Comparación de sustratos | 83 |
| Figura 40. Pasos para la obtención de la harina de proteína de Mosca Soldado Negro | 86 |
| Figura 41. Harina de proteína de larva de Mosca Soldado Negro | 88 |
| Figura 42. Variación de la temperatura en el interior del reactor | 89 |
| Figura 43. Variación de la humedad relativa en el biorreactor | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 44. Variación del contenido de humedad en cada sustrato durante el proceso de biodegradación larvaria | 91 |
| Figura 45. Variación del pH en cada sustrato durante el proceso de biodegradación larvaria | 93 |
| Figura 46. Variación del contenido de cenizas en cada sustrato durante el proceso de biodegradación larvaria | 94 |
| Figura 47. Variación de la longitud de las larvas durante el proceso de biodegradación | 97 |
| Figura 48. Variación del ancho de las larvas durante el proceso de biodegradación | 98 |
| Figura 49. Variación del peso de las larvas durante el proceso de degradación | 98 |
| Figura 50. Valores de tallas larvales reportados por Pérez – Pacheco | 99 |
| Figura 51. Muda de la larva de MSN | 102 |
| Figura 52. Análisis de la varianza de un factor para los máximos pesos de las larvas | 103 |
| Figura 53. Gráfico de media para el análisis de varianza de un factor con respecto al máximo peso de las larvas | 103 |
| Figura 54. Prueba de múltiples rangos para la variable peso (Máximo) para cada sustrato | 104 |
| Figura 55. Análisis de la varianza para los pesos finales de las larvas | 104 |
| Figura 56. Prueba de múltiples rangos para la variable peso (Final) para cada sustrato | 105 |
| Figura 57. Gráfico de las medias para el análisis de varianza de un factor con respecto al peso final de las larvas | 105 |
| Figura 58. Larvas instar 5 | 107 |
| Figura 59. Prepupas instar 6 | 108 |
| Figura 60. Tasa de supervivencia de las larvas de MSN | 113 |
| Figura 61. Indicadores de biotransformación para las larvas alimentadas con residuos frescos y mezclas | 114 |
| Figura 62. Eficiencia en conversión de residuos frescos y mezclas | 117 |
| Figura 63. Tasa de reducción de los sustratos | 118 |
| Figura 64. Contenido límite para variables y componentes del Frass según la NTC 5167 | 121 |

| | |
|--|-----|
| Figura 65. Balance global de materia de residuos frescos | 122 |
| Figura 66. Balance de humedad de residuos frescos | 123 |
| Figura 67. Balance de porcentaje de cenizas en residuos frescos | 124 |
| Figura 68. Balance de nitrógeno total en residuos frescos | 125 |
| Figura 69. Balance de carbono total en residuos frescos | 126 |
| Figura 70. Balance global de materia en las mezclas | 127 |
| Figura 71. Balance de humedad en las mezclas | 128 |
| Figura 72. Balance de porcentaje de cenizas en las mezclas | 129 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Caracterización de residuos orgánicos domésticos – residuos frescos | 62 |
| Tabla 2. Caracterización y composición de residuos frescos | 63 |
| Tabla 3. Caracterización de la fracción mineral de residuos frescos | 63 |
| Tabla 4. Caracterización de residuos cocidos posconsumo | 65 |
| Tabla 5. Caracterización de residuos animales crudos (Cárnicos) | 66 |
| Tabla 6. Caracterización de residuos de poda y césped | 67 |
| Tabla 7. Diseño de experimentos | 73 |
| Tabla 8. Variables iniciales de los sustratos | 95 |
| Tabla 9. Tallas máximas y finales de las larvas en los 4 experimentos | 100 |
| Tabla 10. Composición de larvas en instar 5 y 6 en base seca y base húmeda | 108 |
| Tabla 11. Rangos de composición de prepupa según Abduh | 111 |
| Tabla 12. Caracterización y composición del Frass proveniente de la biodegradación de residuos frescos a partir de MSN | 119 |
| Tabla 13. Caracterización de la fracción mineral del Frass proveniente de la biodegradación de residuos frescos a partir de MSN | 120 |

RESUMEN

La presente investigación tuvo como finalidad evaluar el contenido proteico de las larvas de mosca soldado negro (*Hermetia Illucens Sp.*) a partir del proceso de degradación de biorresiduos; para ello, se alimentaron larvas con dietas basadas en residuos frescos (vegetales y frutas), residuos cocidos (desechos de restaurantes), residuos cárnicos y residuos de poda y césped. Todos los residuos empleados pasaron por un análisis para determinar sus parámetros físicos.

Para el sistema de cultivo fue necesaria la construcción de un biorreactor que permitiera el desarrollo adecuado de las larvas de mosca soldado negro debido a que la temperatura y humedad relativa promedio de la zona de Mochuelo Bajo (12,43°C y 77,85% respectivamente) no son adecuadas para esto; a partir de revisiones bibliográficas previamente realizadas se hizo la selección de las condiciones de temperatura y humedad relativa más favorables para el crecimiento de las larvas; estableciendo así, una temperatura de 27°C y un porcentaje de humedad relativa del 70%.

Dentro de la investigación se realizó el diseño de experimentos con variaciones en cuanto a la relación C/N con el objetivo de determinar que sustrato tiene mejores resultados en cuanto a las tallas de las larvas y los indicadores de bioconversión. Esta variación se logró por medio de la implementación de diferentes sustratos con diferentes composiciones de los principales macronutrientes (proteína, fibra, grasa y carbohidratos) que los componen, en consecuencia, se tuvieron en cuenta para el experimento sustratos de residuos frescos, cocidos, cárnicos y de poda y césped. Igualmente, al final de la investigación se evaluó el contenido de proteína presente en las larvas de instar 5 e instar 6 con la finalidad de cumplir con el objeto de la investigación, dando como resultado 43,2 y 39,8% respectivamente.

Palabras clave: Mosca soldado negro (*Hermetia illucens Sp*), biorresiduos, proceso de degradación, indicadores de biotransformación, residuos cárnicos, residuos frescos, residuos cocidos, residuos de césped y poda, humedad, humedad relativa, temperatura.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá actualmente genera 7.500 toneladas de residuos al día, de los cuales el 16% logra ser aprovechado por 22.000 recicladores registrados ante el distrito; sin embargo, el 51.32% de los residuos son de carácter orgánico [1], los cuales muchas veces no son aprovechados o tratados de la forma correcta. Al día de hoy, Bogotá solo cuenta con una planta para el aprovechamiento de estos residuos en la cual se emplean dos mecanismos de tratamiento: compostaje en apilamiento tradicional y lombricultura [2].

La planta de tratamiento de residuos se encuentra ubicada en la vereda Mochuelo en la localidad de Ciudad Bolívar, zona altamente marginada por la presencia del relleno sanitario Doña Juana; este relleno cuenta con una capacidad de 623 hectáreas para recibir en promedio 194.000 toneladas al mes, además de recibir los desechos generados por la población de la ciudad de Bogotá, también recibe desechos de 6 municipios de Cundinamarca (Choachí, Cáqueza, Ubaque, Chipaque, Fosca y Gutiérrez y Une) [3], lo cual lo convierte en el relleno sanitario más grande del país. A pesar de esto, también se caracteriza por llevar consigo problemas de malos olores, proliferación de vectores e incontrolado manejo de lixiviados que afectan de gran manera a la población que habita en el sector y zonas aledañas [4], además de generar afecciones a la salud, contaminación del suelo, aire y fuentes hídricas que afectan directamente a la población.

Es por esto, que el mundo está en busca de alternativas para tratamiento de residuos orgánicos que sean sostenibles y amigables con el medio ambiente, por lo cual la tecnología de manejo de biorresiduos empleando insectos cada vez toma mayor fuerza. La degradación de residuos orgánicos usando insectos como personaje encargado de la degradación es una alternativa que le otorga un valor agregado al proceso; organismos como la Mosca Soldado Negro (*Hermetia Illucens Sp.*) poseen la capacidad de acumular proteína y lípidos que posteriormente pueden ser extraídos y usados como parte de la alimentación animal o en la producción de biodiesel y aceites, situando así al proceso en un lugar destacado en comparación con demás tecnologías que convergen sostenibilidad económica y ecológica [5].

El fundamento de la degradación de residuos orgánicos usando MSN (Mosca Soldado Negro) es la transformación de los residuos (sustrato) en biomasa larval, esta transformación se da a partir del periodo de alimentación que corresponde a la etapa larval del ciclo de vida (2 a 4 semanas); la duración de este periodo depende de factores ambientales como la temperatura y la humedad relativa [5]. A lo largo de diversas investigaciones se ha experimentado la degradación de diferentes biorresiduos o mezclas de estos que permitan obtener o generar la mayor producción de proteína y grasas de calidad. Es por esto, que en el presente proyecto se busca determinar la influencia de diferentes sustratos y demás variables que influyen en el proceso de degradación con el objetivo de cuantificar la proteína final generada por las larvas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar el contenido proteico en larvas de *Hermetia Illucens* durante el proceso de degradación de biorresiduos en la localidad de Ciudad Bolívar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar las condiciones para biodegradación larvaria en la zona motivo de estudio.
- Caracterizar fisicoquímicamente los residuos orgánicos en el barrio El Mochuelo ubicado en la localidad de Ciudad Bolívar.
- Establecer el contenido proteico de las larvas de *Hermetia Illucens* Sp. en los instares 5 y 6 durante el proceso de transformación de biorresiduos.

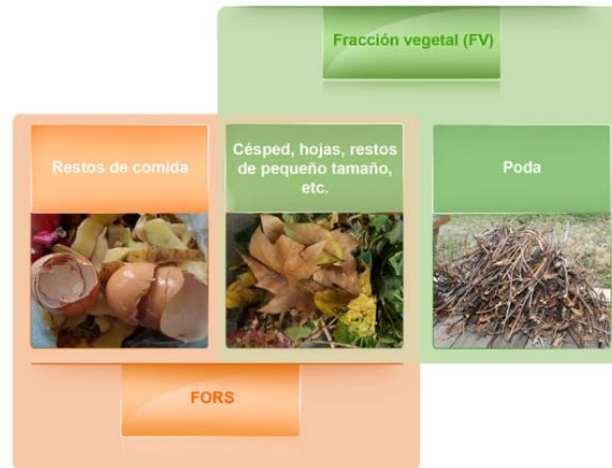
1. BIORESIDUOS Y SUS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

Los biorresiduos hacen referencia a la fracción sólida de residuos orgánicos (FORSU); estos se definen como un subconjunto de los residuos biodegradables. Los biorresiduos se caracterizan por estar constituidos únicamente por residuos de jardines, residuos de podas y residuos de alimentos tanto de hogares, restaurantes y demás. Dichos residuos tienen la capacidad de degradarse rápidamente por medio de microorganismos o agentes fisicoquímicos, convirtiéndose así en otro tipo de materia orgánica [6].

Los biorresiduos se pueden clasificar según su naturaleza en residuos orgánicos de origen alimenticio, residuos vegetales y residuos originarios de poda. La fracción orgánica de este conjunto está constituida por los desechos generados en la elaboración, producción y manipulación de productos alimentarios, restos sobrantes de comida y alimentos en mal estado o que no se consumieron dentro del periodo óptimo, y por la fracción vegetal que está compuesta por los restos vegetales de tamaño pequeño y de tipo no leñoso procedentes de jardinería y poda como ramos de flores, césped, pequeñas ramas, hojarasca y demás. Por otro lado, la fracción perteneciente a la poda comprende los restos vegetales de la jardinería y poda de mayor tamaño y de tipo leñoso [7].

Figura 1.

Clasificación de los biorresiduos

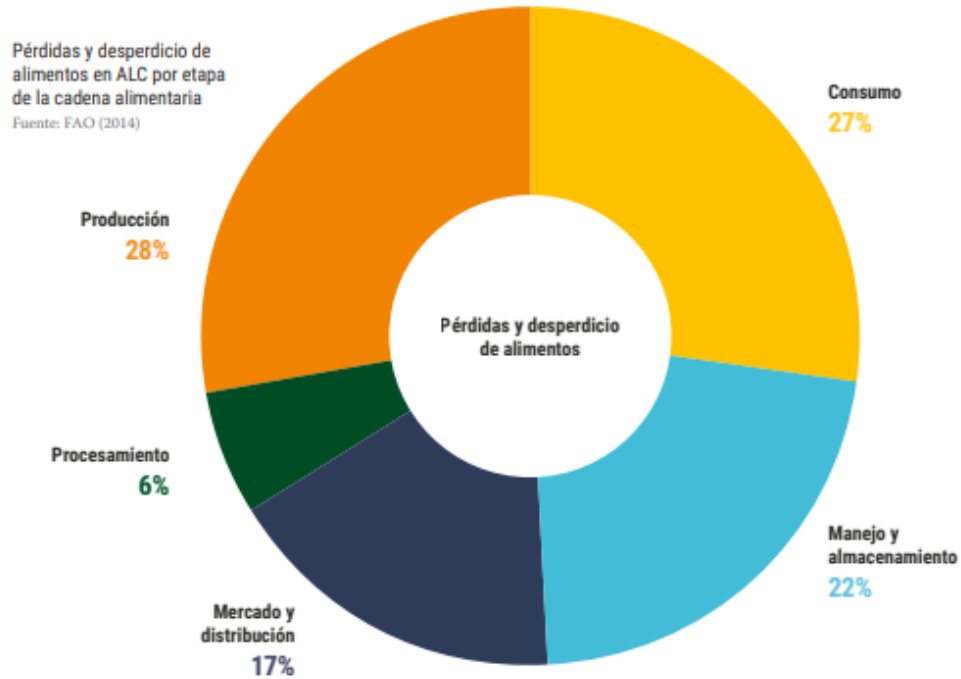


Nota. Clasificación de biorresiduos entre la fracción vegetal y la fracción orgánica. Tomado del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, [En línea] Disponible: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/biorresiduos/> [Acceso: mar.13,2020]

Dentro del conjunto de biorresiduos, se encuentran principalmente los residuos de alimentos, estos son aquellos restos de comida que quedan antes o después del consumo y/o producción. Aproximadamente un tercio de la producción alimentaria mundial para consumo humano, equivalente a 1.300 millones de toneladas se desperdicia cada año; según estudios, los mayores porcentajes de pérdida se encuentran en las etapas de producción (28%) y consumo (27%) [8].

Figura 2.

Pérdidas y desperdicio de alimentos en América Latina y el Caribe por etapa de la cadena alimentaria.



Nota. La gráfica representa el porcentaje de desperdicio de alimentos según la etapa de la cadena alimenticia (Producción, procesamiento, mercado y distribución, manejo y almacenamiento y consumo). Tomado de: Organización de las Naciones Unidas - Medio Ambiente (ONU), *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe*. 2018.

El desperdicio de alimentos contiene múltiples aspectos negativos tanto económicos como ambientales, sociales y morales, esto se debe principalmente al aumento de población que se ha dado exponencialmente en los últimos años. Este desperdicio es preocupante debido a que “proyecciones que indican que la producción global de los desperdicios de alimentos, será más del doble de su valor actual para 2050 si los hábitos de consumo y las prácticas de producción de alimentos no cambian drásticamente” [9], por este motivo es necesario darle un tratamiento adecuado a estos desechos, buscando alternativas en donde se puedan aprovechar algunos de los compuestos que integran a estos.

Actualmente el manejo de los residuos sólidos urbanos o biorresiduos se ha convertido en un desafío para las entidades de orden municipal debido a sus altas tasas de generación e ineficientes métodos de manejo y tratamiento. Según la Organización de las Naciones Unidas [8], en América Latina, los residuos orgánicos representan el 50% de los residuos generados en la región; sin embargo, la disposición de este tipo de residuos a cielo abierto significan riesgos a la salud tanto de los operadores como de la población cercana a la zona, además de esto, la disposición de residuos a cielo abierto conlleva severas problemáticas ambientales como la contaminación de cuerpos de agua, emisión de gases tóxicos y gases de efecto invernadero.

Al tener una gran acumulación de biorresiduos, el factor de la alta velocidad con la que estos se degradan puede descontrolarse generando así impactos ambientales significativos y graves problemáticas a la salud. Esta degradación puede darse en presencia de oxígeno como también en su ausencia (aeróbicamente o anaeróbicamente) y el mayor impacto se presenta en la atmósfera, el suelo y el agua, tanto superficial como subterránea, debido a la presencia de elementos minerales, patógenos, metales pesados, entre otros materiales contaminantes presentes en los residuos orgánicos [6]. En la Figura 3 se puede evidenciar los principales impactos ambientales y las consecuencias de estos.

Figura 3.

Impactos de acumulación de biorresiduos y consecuencias

| IMPACTO | CONSECUENCIA |
|--|---|
| Contaminación del suelo por lixiviados | Deterioro de la salud pública y ambiental |
| Contaminación de aguas subterráneas por lixiviados | Deterioro de la salud pública y ambiental |
| Emisión de gases de efecto invernadero | Calentamiento global |
| Aparición de plagas (moscas, ratones...) | Deterioro de la salud pública |
| Malos olores | Deterioro de la salud pública y el confort de la población |
| Contaminación visual | Deterioro del confort de la población y disminución del turismo |

Nota. En esta figura se muestran los principales impactos de la acumulación de biorresiduos y sus consecuencias. Tomado de I. Zabaleta, A. Mertenat, L. Scholten, and C. Zurbrügg, *Selecting Organic Waste Treatment Technologies*. 2020. [Online]. Available: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/swm/SOWAT_T/sowatt.pdf

Durante años los residuos orgánicos han sido una dificultad a la hora de ser reutilizados o eliminados; este tipo de residuos son los que más se generan, pero menos se gestionan, modelos tradicionales como el vertido o incineración han generado mejores resultados en cuanto a eficiencia del proceso, sin embargo, su afectación ambiental y social es altamente considerable. Actualmente se buscan alternativas que logren explotar el potencial que poseen los biorresiduos para generar energía, reducir la contaminación ambiental y minimizar la carga sobre el consumo de combustibles fósiles, además de generar productos con alto valor industrial y que promuevan la economía circular.

Dentro de las principales alternativas que se promueven para el manejo y gestión de biorresiduos está el compostaje, el vermicompostaje, la digestión anaeróbica y el método de pirolisis lenta; sin embargo, cabe resaltar que el término de biorrefinería cada vez toma mayor fuerza dentro de la industria; este busca realizar una transformación de la biomasa hacia

combustibles, energía y productos químicos por medio de métodos como acidogénesis, solventogénesis, metabolismo oleaginoso, entre otros.

Sin importar que alternativa se escoja para el manejo de los biorresiduos, la durabilidad y sostenibilidad de cada una depende de tres factores sumamente importantes. En primer lugar, se encuentra la factibilidad técnica, donde se tiene en cuenta el área de tierra necesaria para llevar a cabo la tecnología de manejo de residuos orgánicos, considerando la capacidad que usará la materia prima y los residuos que se formen en el proceso. El segundo factor a resaltar es la viabilidad económica que comprende los costos tanto de capital como operativos que surjan en la instalación de la tecnología de tratamiento, también es necesario tener en cuenta los flujos de ingresos que se tengan en ventas de los productos obtenidos después del tratamiento. Por último, el impacto social es crucial, este considera aspectos como la generación de empleos y las amenazas que puedan repercutir en la salud de las personas aledañas a la ubicación en donde se planea realizar el manejo de residuos orgánicos. [6]

1.1 Tecnologías de tratamiento de biorresiduos

1.1.1 Compostaje

“El compostaje es una alternativa de degradación de residuos de tipo orgánico que se define como la descomposición biológica y la estabilización de sustratos orgánicos, en condiciones que permiten el desarrollo de temperaturas termófilas como resultado del calor producido biológicamente, para producir un producto final que es estable, libre de patógenos y semillas de plantas, y puede ser aplicado beneficiosamente a la tierra” [10].

Existen diferentes tipos de compostaje que pueden ser aplicados al manejo de residuos, se encuentra el compostaje en hileras, el compostaje en pila estática aireada o el compostaje de tambor rotatorio; estos se diferencian principalmente por el tiempo empleado durante el proceso y la calidad de producto que se obtiene al final de este.

En cuanto al sustrato apto para el proceso, se puede implementar cualquier tipo de residuo orgánico como recortes de jardín, residuos vegetales, residuos de frutas, residuos de animales, entre otros, con una relación nitrógeno - carbono entre 20-50; además de este factor, es necesario controlar la temperatura, humedad y pH [6]. Se estima que el tiempo de procesamiento es entre 3 – 6 meses y el producto que se obtiene contiene nutrientes esenciales para el crecimiento de cultivos y tiene la capacidad de reemplazar los fertilizantes químicos convencionales [11].

1.1.2 Vermicompostaje

La importancia de las lombrices de tierra en el proceso de tratamiento de residuos orgánicos es sumamente significativa, el producto obtenido tiene un valor agregado de 100 a 1000 veces mayor que el producto obtenido en diferentes técnicas comunes de compostaje. “Las lombrices de tierra biodegradan todos los desechos orgánicos en vermicompost por acción enzimática y mediante la proliferación de microbios descomponedores en la biomasa de desechos en miles de millones y billones en poco tiempo” [12]. Este proceso es eficiente en temperatura ambiente debido a que las lombrices mejoran de un 60 a 80% el compostaje de los biorresiduos sin necesidad de aumentar o disminuir la temperatura con un equipo adicional [12].

“En condiciones óptimas de temperatura y humedad, unas 1000 lombrices (½ kg) pueden vermicompostar 10 kg de residuos orgánicos o 10.000 lombrices (5 kg) pueden vermicompostar 1 tonelada de residuos orgánicos en tan solo 30 días”[12]. Cada lombriz adulta diariamente se alimenta de materia orgánica de forma proporcional a su peso, es decir que al tener 64 millones de lombrices se consumirán 64 toneladas de biorresiduos diarios. El producto final obtenido en este proceso es el vermicompost, un fertilizante orgánico altamente nutritivo, con micronutrientes y microbios beneficiosos para el suelo [12].

1.1.3 Digestión Anaerobia

Es un proceso anaerobio donde la materia orgánica se descompone bioquímicamente para generar biogás y un digestato rico en nutrientes. Su tiempo de procesamiento es entre 10 – 40 días y posee la capacidad de degradar residuos vegetales, de alimentos y estiércol; dentro de este

proceso se debe controlar factores como la temperatura, humedad, relación C:N y pH; además de esto, también se debe considerar los parámetros de operación como: contenido de sólidos totales (sistemas húmedos/secos) y modo de alimentación (lotes/continuo) [6].





1.1.4 Pirolisis lenta

Es un proceso termoquímico que consiste en la descomposición de materia orgánica a elevadas temperaturas (300°C – 600°C) en ausencia de oxígeno; su duración es entre horas y días y genera como resultado final productos sólidos (carbón vegetal), líquidos (bioaceite) y gaseosos (gas de síntesis). Dentro de este proceso, los factores a tener en cuenta son la temperatura, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la presión del reactor, el tamaño de partícula y la composición química de la biomasa [6].

Adicional a las tecnologías mencionadas anteriormente, han surgido nuevas alternativas de tratamiento de residuos orgánicos en donde se implementa el uso de insectos como actores principales dentro del proceso, estos logran transformar biológicamente los biorresiduos en biomasa con alto valor nutricional que puede ser destinada para consumo humano o animal.

En la Figura 4 se puede observar las principales características de los procesos y factores más influyentes de las principales alternativas mencionadas con una de las alternativas para el manejo de residuos por medio de insectos más relevante: *Hermetia Illucens Sp.*

Figura 4.
Tecnologías de tratamiento de biorresiduos.

| | Compostaje | Lombricultura | Digestión anaerobia | Procesamiento con mosca soldado negro |
|----------------------------|--|---|--|---|
| Descripción | <p>Proceso microbiológico aeróbico en donde se transforma material orgánico en material estable llamado compost.</p>  | <p>Proceso de degradación aeróbica, empleando microorganismos y lombrices que promueven la actividad microbiana produciendo el vermicompost.</p>  | <p>Descomposición bioquímica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno generando como resultado biogás.</p>  | <p>Transformación biológica de residuos orgánicos por medio de larvas de mosca soldado negro, obteniendo biomasa de las larvas y un residuo de biorresiduos tratados similares al compost.</p>  |
| Tiempo | 3 - 6 meses | 1,5 - 2,5 meses | 10 - 40 días | 14 días |
| % Reducción de masa | 35 - 40% | 40 - 80% | 0 - 20% | 50 - 80% |

| | | | | |
|-------------------------|--|---|---|---|
| T de operación | <ul style="list-style-type: none"> • Pilas grandes: T > 0°C • Pilas pequeñas: T > 15°C | <ul style="list-style-type: none"> • T min: 15°C • T opt: 20-25°C • T máx.: 35°C | <ul style="list-style-type: none"> • T min: 15°C • T opt: 25-30°C • T máx.: 40°C | <ul style="list-style-type: none"> • T adecuada: 15-47°C • T óptima: 28-32°C |
| Relación C/N | 20:50 | 15:25 | 16:25 | No es relevante |
| pH | 5,5 - 7,5 | Aceptable: 4,5 - 9 Óptimo: 7,5 - 8 | 6 - 7,5 | 4,5 - 8,9 |
| Ejemplos biomasa | <ul style="list-style-type: none"> • Recorte de jardín • Residuos vegetales y de frutas • Residuos de pescado o carne | <ul style="list-style-type: none"> • Residuos de vegetales y frutas • Estiércol animal • Fracción orgánica de residuos sólidos municipales | <ul style="list-style-type: none"> • Residuos de vegetales y frutas • Residuos de pescado o carne • Estiércol animal | <ul style="list-style-type: none"> • Residuos de vegetales y frutas • Residuos de pescado o carne • Estiércol animal |
| Producto final | <ul style="list-style-type: none"> • Compost como material que mejora la estructura del suelo aportándole nutrientes • Subproductos: Lixiviados, vapor de agua, CO₂ | <ul style="list-style-type: none"> • Vermicompost como material estable que ofrece mayor disponibilidad de nutrientes que el compost • Subproductos: Lixiviados y lombrices ricas en proteína | <ul style="list-style-type: none"> • Biogás compuesto por metano, dióxido e impurezas • Subproductos: Digestato rico en nitrógeno | <ul style="list-style-type: none"> • Larvas con alto contenido proteico • Subproductos: Residuos con un contenido valioso de nutrientes |

Nota. Esta figura describe las principales tecnologías para el manejo de biorresiduos, el tiempo de duración de cada alternativa, las variables óptimas para su desarrollo, ejemplos de biomasa empleada y finalmente el producto obtenido. Tomado de I. Zabaleta, A. Mertenat, L. Scholten, and C. Zurbrügg, *Selecting Organic Waste Treatment Technologies*. 2020. [Online]. Available: <https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/swm/SOWATT/sowatt.pdf>

1.2 Uso de insectos en el tratamiento de biorresiduos

El manejo que se le ha dado a los residuos de carácter orgánico con el paso del tiempo ha conllevado a buscar nuevas tecnologías que permitan la disminución del impacto al medio ambiente, principalmente la parte relacionada con la liberación de gases de efecto invernadero (GEI); el uso de métodos tradicionales como el vertido y el compostaje, que involucran un tiempo prolongado de almacenamiento de residuos liberan al ambiente CO₂ Y CH₄ [13].

Dentro de las nuevas tecnologías para el tratamiento de los biorresiduos se encuentra el uso de insectos, los cuales se identifican como una fábrica biológica prometedora y efectiva para reciclar varios materiales de desecho biológico [13]; cabe resaltar que una sociedad en aumento genera cada vez más desechos; el Banco Mundial en su informe de 2018 plantea que si no se adoptan medidas urgentes, para 2050 los desechos a nivel mundial crecerán en un 70% con respecto a los niveles actuales [14].

Los insectos por su característica detritívora poseen la capacidad de tener una participación activa dentro de la gestión y degradación de residuos orgánicos, especialmente de los desechos de alimentos ya que además de gestionar grandes cantidades de residuos, pueden generar materiales valiosos para la industria como materia orgánica para ser estabilizada y usada como fertilizante o acondicionador de suelos, proteína para alimento tanto humano como animal, biocombustibles, lubricantes, productos farmacéuticos, colorantes y demás [15].

Para la incorporación de insectos dentro del procesamiento de residuos, es necesario implementar un proceso de crianza con el objetivo de tener abundancia y disponibilidad de los insectos al momento de llevar a cabo la degradación; para esto, es vital realizar una selección adecuada del insecto que se va a implementar dentro del proceso teniendo en cuenta factores como los atributos físicos, el comportamiento de alimentación, su morfología, el ciclo de vida, la inmunidad a enfermedades entre otros [16]. Así mismo, al momento de la crianza se debe considerar la composición y la consistencia del sustrato como las características físicas, químicas y microbiológicas, el contenido de humedad, el perfil de nutrientes y la seguridad microbiana, además de esto se debe tener claro si el sustrato requiere tratamientos previos físicos y/o biológicos

o una etapa de pre fermentación con el objetivo de mejorar la digestibilidad del sustrato y la disponibilidad de los nutrientes [16].

La industria de alimentos a partir de insectos va de la mano con el tratamiento de biorresiduos con base en estos. Los insectos presentan diferentes ventajas sobre otros recursos alimenticios convencionales ya que crecen rápido, se reproducen con facilidad, no requieren tierra cultivable y necesitan de poca energía y agua [17]; además, poseen altos niveles de proteína, ácidos grasos, aceites saludables y demás compuestos dependiendo de la especie, su ciclo de vida, el método de crianza, el sustrato proporcionado, entre otros, sin embargo, la alimentación a partir de materia orgánica incrementa este tipo de nutrientes de alto valor para la alimentación tanto humana como animal, “su idoneidad para la bioconversión de materiales de desecho depende de la capacidad de los insectos para biodegradar eficientemente una amplia variedad de materiales de desecho y las composiciones nutricionales de los insectos obtenidos después de una bioconversión exitosa” [13].

Debido a las importantes ventajas nutricionales que presentan los insectos frente a otras alternativas convencionales para generar proteína, la industria se ha enfocado en este campo con el objetivo de generar diferentes tipos de productos que le otorguen un valor agregado al manejo de residuos, especialmente a los residuos de alimentos; empresas como Agriprotein, Entosystem, Protix y Goterra han basado su negocio en la economía circular a partir de la reutilización de alimentos desechados que les permite elaborar productos como proteína animal, aceites ricos en ácidos grasos esenciales, fertilizantes orgánicos y demás.

El consumo de insectos se remonta a cientos de años atrás, sin embargo, no se había estudiado como una verdadera alternativa para la alimentación y menos como una nueva tecnología con la capacidad de involucrar el manejo de residuos orgánicos y la producción de alimentos y demás productos con alto valor para la industria, este proceso se concentra en el concepto de la biorrefinería, la cual se puede definir como una plataforma que convierte biomasa y sus residuos en bioproductos como bioenergía, productos bioquímicos, biopolímeros y alimentos para animales [18].

Al momento de seleccionar el insecto adecuado para el proceso de gestión de residuos orgánicos se debe evaluar el factor nutricional, la capacidad de degradar este tipo de residuos y una posible obtención de materiales valiosos para la industria; a partir de estos factores, se ha estudiado la facultad de diferentes insectos y algunos invertebrados y su uso potencial en el tratamiento de desechos orgánicos.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, las especies de insectos más consumidas son los escarabajos (31%), las orugas (18%) y las abejas, avispas y hormigas (14%), además de estos también hay registros del consumo de saltamontes y grillos (13%), las cigarras, los fulgoromorfos, saltahojas, cochinillas y chinches (10%), las termitas (3%), las libélulas (3%), las moscas (2%) y demás (5%) [19]; sin embargo, es importante resaltar que no todas las especies mencionadas anteriormente poseen la capacidad de alimentarse de residuos orgánicos por lo cual no son aptas para el proceso de degradación de estos y posterior obtención de proteína y otros productos.

A partir de diferentes investigaciones y estudios, se ha evaluado la capacidad de diferentes insectos y algunos invertebrados para manejar residuos y a su vez generar productos secundarios, se ha observado la incidencia de las condiciones de crecimiento, el sustrato suministrado en la etapa de alimentación, su composición nutricional, entre otros con el objetivo de poder definir los insectos con mejor perfil para gestionar residuos, las condiciones ambientales que requieren, los sustratos más favorables para su crecimiento y así realizar este tipo de procesos a gran escala.

El vermicompostaje es de las técnicas que involucran invertebrados con mayor desarrollo actualmente, consiste en un “proceso de descomposición natural mesófilo bio-oxidativo en el que las lombrices de tierra y los microorganismos mineralizan sinérgicamente los sustratos de desechos orgánicos y los convierten en abono orgánico rico en nutrientes” [20]. A partir de este proceso se obtienen dos productos de valor industrial, el vermicompost y la lombriz; el vermicompost se puede emplear como un acondicionador de suelos ya que posee altos niveles de nutrientes, ácido húmico y hormonas de crecimiento; por medio de estudios se ha demostrado que el este puede aumentar la germinación de las semillas, el crecimiento vegetativo de los cultivos y el rendimiento

sin comprometer la salud de los suelos. En el caso de las lombrices, estas se pueden usar como alimento para animales [21].

Las lombrices de tierra empleadas en este método con mayor eficacia en el vermicompostaje son de tipo epigeas (*Eisenia fétida*, *Eisenia andrei*, *Eudrilus eugeniae* y *Perionyx excavatus*), esto se debe a sus altas tasas de reproducción, tolerancia a diferentes condiciones ambientales, rápida tasa de vermiconversión y gran capacidad de alimentarse de diferentes tipos de residuos [21].

Dentro del grupo de insectos que se han estudiado se encuentra el gusano amarillo de la harina (*Tenebrio Molitor*), este es una especie autorizada por la comisión europea para la alimentación de peces; se alimenta de cereales, harinas y sus derivados [22], las larvas se pueden alimentar de residuos orgánicos y residuos agrícolas de baja calidad generando a cambio una fuente nutricional de alto valor.

Las larvas del gusano amarillo de la harina comprenden ~50% de proteína y ~35% de lípidos en base a materia seca, además tiene alto contenido de aminoácidos esenciales y ácidos grasos insaturados, principalmente ácido oleico [13]. Henry, Gai, Enes, Pérez – Jiménez y Gasco estudiaron el efecto del reemplazo parcial de la harina de pescado por harina de las larvas del gusano amarillo en la respuesta inmune innata y en las enzimas antioxidantes intestinales de la trucha arcoíris en donde se registró que

«los presentes resultados muestran un fuerte aumento de la actividad de las enzimas intestinales antioxidantes y una reducción de la peroxidación lipídica. También se detectaron una mayor inhibición de la tripsina y una actividad antibacteriana más rápida del suero. Estas evidencias podrían deberse a las similitudes fisiológicas entre el exoesqueleto de parásitos e insectos. Los presentes hallazgos refuerzan los resultados anteriores que revelaron un efecto positivo de la dieta TM en el crecimiento de la trucha arcoíris y confirman aún más su idoneidad para el reemplazo parcial de la harina de pescado en los alimentos acuícolas». [22]

Una especie con alto potencial para la alimentación animal son los grillos, esto se debe principalmente a su fácil crianza y a su alto contenido proteico, aproximadamente del 70% [15];

sin embargo, un desafío en cuanto a esta especie es lograr altos rendimientos a partir de sustratos provenientes de desechos orgánicos. Adicional a los grillos, los saltamontes tienen la capacidad de usar residuos de origen vegetal para convertirse posteriormente en fuente de alimento animal, específicamente el saltamontes de cuernos cortos puede llegar a contener hasta un 60% de proteína [13].

El Mojojoy (*Rhynchophorus palmarum*), es una especie que se considera como plaga en el cultivo de la palma de aceite, caña de azúcar y palma de coco, sin embargo, en otras especies vegetales se suele alimentar de frutos maduros sin convertir a la planta en hospedera [23]. Actualmente, se ha estudiado alimentar a las larvas de esta especie con residuos orgánicos de piña, papaya, banano o caña [24]. En cuanto a su perfil nutricional, se ha observado por medio de análisis proximales una composición de 45.82% de proteína y 22.15% de grasas totales en peso seco; además es rico en aminoácidos esenciales, principalmente valina e isoleucina [25]. El alto valor nutricional y su capacidad de alimentarse de desechos vegetales convierte al Mojojoy en una especie potencial para el manejo de residuos y a su vez generar productos secundarios como lo es la harina de las larvas con alto valor proteico y aceite usado en casos medicinales.

Un orden de insectos con alto grado de importancia dentro del manejo de residuos son los dípteros, que incluye a moscas con la capacidad de descomponer materia orgánica tanto animal como vegetal, se caracterizan por ser fitófagos, saprófagos, coprófagos entre otros, lo cual les permite tener un papel importante e imprescindible dentro del medio ambiente [26]. Existen diferentes especies de moscas que pueden ser empleadas para la biodegradación de residuos orgánicos, sin embargo, se debe evaluar la incidencia de factores como comportamiento, tamaño, fecundidad, ciclo de vida, estado de la plaga, adaptabilidad, y demás en la eficiencia del proceso y el grado de éxito que este puede llegar a tener [27].

La mosca doméstica (*Musca Domestica L.*) ha sido estudiada desde el siglo XX para la alimentación potencial del ganado usando como sustrato de crianza el estiércol [28], sin embargo, su condición de plaga, el uso seguro de insectos y la seguridad alimentaria han sido preocupaciones constantes que no han permitido su aplicación potencial tanto a la degradación de residuos como a la alimentación animal. En cuanto a los sustratos empleados para su desarrollo, se ha observado

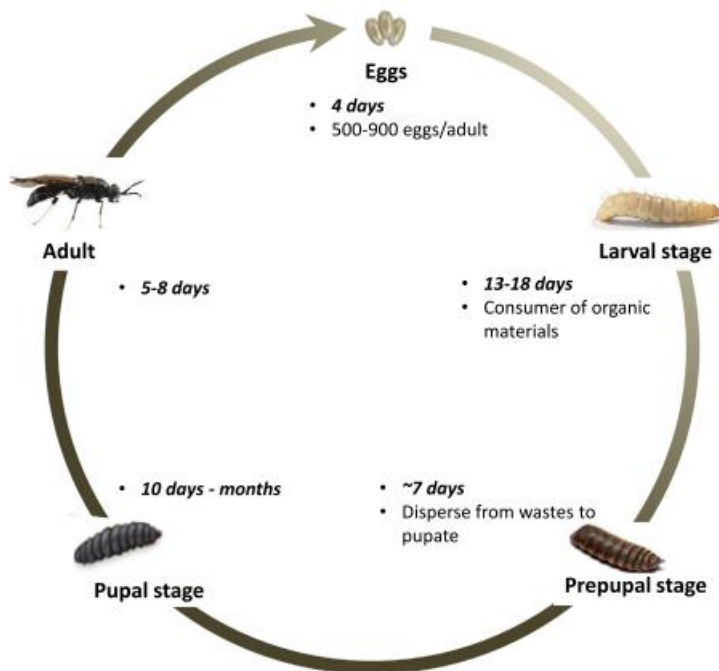
que la mosca doméstica se desarrolla mejor en estiércol de animales alimentados con dieta mixta (porcinos, aves, terneros) que en estiércol de herbívoros (vaca, cabra, caballo) [27]. Con respecto a su valor nutricional, las larvas de mosca doméstica poseen un nivel de proteína cruda entre 29 – 60% en masa seca, aminoácidos esenciales como metionina, fenilalanina y tirosina y también tiene un importante contenido de ácidos grasos insaturados y de minerales [13].

La mosca botella verde (*Lucilia Sericata*) se caracteriza porque sus larvas son sarcófagas y necrófagas, lo cual permite que sean una alternativa para la degradación de estiércol y desechos de la industria de la carne [27]; además de esta especie, se encuentra la mosca de la cara (*Musca autumnalis L.*), esta especie puede alimentarse de estiércol de ganado; son fuente de fósforo, calcio, magnesio y otros minerales, sin embargo, son organismos que pueden ser transmisores de enfermedades como conjuntivitis y telaziasis [27]. Por otro lado, está la mosca común de la carne (*Sarcophaga Carnaria L.*), la cual se ha evaluado a nivel laboratorio como descomponedor de residuos de carne [27].

En la actualidad, el uso de la larva de mosca soldado negro (*Hermetia Illucens Sp.*) es la alternativa de manejo de residuos orgánicos más estudiada y como mayor potencial de aplicabilidad y rentabilidad en la industria. Es un insecto de tipo saprofito no plaga [5] que se puede alimentar de una extensa variedad de desechos como estiércol, paja de arroz, desechos de alimentos, granos de destilería, lodos fecales, despojos de animales, desechos de cocina y demás [29]; su ciclo de vida consta de cinco etapas: huevo, larva, prepupa, pupa y mosca [30] (Figura 5). Es importante resaltar en relación a esto el termino instar, el cual corresponde a pequeños periodos dentro de la etapa de larva, la cual está compuesta en su totalidad por cinco (5) instares y la etapa de prepupa corresponde al sexto (6) y último instar.

Figura 5.

Ciclo de vida de Hermetia Illucens Sp.



Nota. La figura representa el ciclo de vida de la mosca soldado negro (*Hermetia Illucens Sp.*). Tomado de K. C. Surendra, J. K. Tomberlin, A. van Huis, J. A. Cammack, L. H. L. Heckmann, and S. K. Khanal, “Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF),” *Waste Manag.*, vol. 117, pp. 58–80, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.07.050.

«El enfoque consiste en alimentar a las larvas de mosca con biorresiduos. Esto reduce la cantidad de desechos en un 50–80 % (peso húmedo) a un residuo y puede desarrollar larvas que se pueden cosechar después de aproximadamente 14 días con una tasa de conversión de desechos a biomasa de hasta el 20 % (sobre una base sólida total)» [31].

Las larvas de mosca soldado negro se caracterizan por su alto valor nutricional, poseen alto contenido de proteínas (25.5 – 52% MS), su contenido de grasa cruda puede alcanzar hasta un 49% de MS, en donde predominan los ácidos grasos saturados, además posee un buen perfil de aminoácidos [13]. Su perfil nutricional permite que el tratamiento de residuos orgánicos con larvas de mosca soldado negro sea tan atractivo, ya que al poder explotar la parte de proteína para generar alimento animal y la parte de ácidos grasos para obtener biodiesel se le otorga un valor agregado

al proceso. Sin embargo, la composición de proteína, lípidos y demás nutrientes de las larvas depende significativamente del sustrato que se proporcione como alimento durante la etapa de crianza; según diferentes estudios y autores este puede llegar a influir en la longitud, el peso, la velocidad de crecimiento, el porcentaje de proteína y lípidos, el perfil de aminoácidos y ácidos grasos, la tasa de bioconversión de residuos, la tasa de supervivencia de las larvas dentro del sustrato y demás.

La inclusión de la mosca soldado negro en la gestión de residuos conlleva múltiples beneficios tanto ambientales como sociales y económicos. Dentro de los principales beneficios del uso de la especie se encuentra la rápida reducción de grandes cantidades de residuos, baja huella de carbono, alta conversión de alimento a masa corporal, no ser un vector de enfermedades, reducción de patógenos, producción de materiales valiosos, bajo uso de recursos como el agua y la tierra, etc.[32].

A través de diferentes estudios, se ha establecido que la biomasa larval de MSN obtenida por medio de la conversión de residuos orgánicos es una fuente de aceites y proteínas con múltiples aplicaciones industriales como la obtención de alimento animal, biodiesel, biopolímeros (quitina) y compostaje del suelo; además, las larvas procesadas se han incorporado en la alimentación de aves de corral, peces y cerdos, en reemplazos parciales de la harina de soja y de la harina de pescado con el objetivo de evaluar el rendimiento en estos animales [32].

La mosca soldado negro posee diferentes ventajas sobre las demás especies de su orden, su principal ventaja se relaciona con su comportamiento, la MSN tiende a posarse sobre la vegetación sin acercarse a los humanos, además ejerce un papel de control biológico sobre la mosca doméstica en el lugar en que se encuentra; la mosca en su etapa adulta no requiere de alimento y a pesar de tener un ciclo de vida más extenso que el de la Mosca doméstica, se obtienen pupas mucho más grandes [27].

Además de las ventajas ya mencionadas sobre las demás moscas, la mosca soldado negro resalta de los demás insectos con potencial aplicación en el tratamiento de residuos por su adaptabilidad al medio en el que se encuentra, dependiendo de esto ajustan su tasa de crecimiento

y la acumulación de nutrientes [33], sin embargo, en algunas ocasiones es necesario realizar pre tratamientos al sustrato que le permitan a las larvas una mejor digestibilidad. En ocasiones, los sustratos empleados están compuestos de moléculas complejas que deben ser degradadas, para esto se emplean diferentes métodos de pre tratamiento como el microbiano, químico, a base de calor y combinaciones entre estos [34], además de los ya mencionados pre tratamientos, también se puede implementar una etapa de pre fermentación que mejore la digestibilidad y disponibilidad de nutrientes en el medio a las larvas.

En comparación con otros insectos, la mosca soldado negro procesa rápidamente los desechos orgánicos, restringiendo así el crecimiento bacteriano y la producción de malos olores, además se ha mencionado que las larvas de esta especie poseen antibióticos naturales y tienen la capacidad de modificar la microflora del estiércol reduciendo la presencia de bacterias dañinas [35].

La eficiencia del proceso de bioconversión con larvas de MSN posee un mejor rendimiento en comparación al compostaje, emplea tiempos más cortos dando como resultado productos de alta calidad en condiciones favorables [36], específicamente:

- **Temperatura:** Los insectos al ser especies poiquilotérmicas (sangre fría) no poseen la capacidad de regular la temperatura de su cuerpo [37], por lo cual, su tasa de desarrollo es determinada por la temperatura ambiente [38]. La mosca soldado negro, al ser una especie tropical se desarrolla en relación a la temperatura donde habita, cuando las temperaturas son bajas el desarrollo es más lento. Tomberlin [39] afirma que los adultos más pequeños y un ciclo de vida corto se puede asociar con un aumento de temperatura, además de esto, señala que el límite superior para un desarrollo óptimo de la mosca soldado negro se encuentra entre 30 y 36 °C, dejando como un rango adecuado de crecimiento entre 27 y 30°C, sin embargo, un desarrollo a 27°C produce larvas con 5% más de peso y un 10% de ciclo de vida más extenso que las larvas que se desarrollan bajo una temperatura de 30°C.
- **Humedad relativa:** El desarrollo larvario, la etapa de apareamiento y la fase de oviposición de la mosca soldado negro son altamente influenciadas por la humedad relativa presente en el

ambiente [30]. Holmes [40] afirma que la humedad relativa tiene efectos significativos sobre la eclosión del huevo y en la emergencia de la mosca adulta; además, en su ensayo se observó que en tasas de humedad relativa superiores al 50% se logra la supervivencia de la colonia aunque hubo un mayor éxito en tasas de humedad del 60 y 70%.

- Contenido de humedad: El contenido de humedad presente en el sustrato suministrado a las larvas de mosca soldado negro puede llegar a afectar de manera directa el rendimiento en el proceso de bioconversión junto al crecimiento y supervivencia de las larvas. Estudios indican que un contenido de humedad entre el 70 y 75% facilita la separación de larvas y sustrato, sin embargo la mejor tasa de bioconversión se observa en tasas de humedad del 80% [41].
- pH: Se considera como un parámetro que afecta tanto el ciclo de vida como la supervivencia de BSF. Estudios indican que un pH inicial entre 6 y 8, se puede observar una tasa de supervivencia significativamente alta en comparación a demás valores de pH, además, pH entre 6 y 10 arrojaron valores mayores en cuanto al peso de las larvas [42].
- Fuente de luz: Este factor es sumamente importante en cuanto a la etapa de apareamiento de la especie *Hermetia Illucens Sp*, normalmente esta es la razón por la cual no hay una reproducción durante la época de invierno. Park en 2016 informó que la luz artificial tiene gran influencia en los eventos reproductivos; esta es una ventaja cuando la cría se da por fuera de su hábitat nativo [30].
- Aireación: El efecto de la aireación incide de manera significativa tanto en la producción de las larvas como en la descomposición del sustrato. Estudios realizados mostraron que una aireación de 0,57 y 0,05 ml min⁻¹ g de peso seco⁻¹ genera un 95% de peso máximo de cosecha de las larvas [43].

En la Figura 6 se realiza una comparación entre los principales insectos usados en el manejo de residuos, teniendo en cuenta sus características más relevantes, las condiciones óptimas para su crecimiento, el alimento más adecuado, la duración del ciclo de vida y las diferentes aplicaciones.

Figura 6.*Insectos usados en la biodegradación de residuos orgánicos*

| Especie | Características | Condiciones óptimas | Alimento | Ciclo de vida | Aplicaciones |
|--|---|---|--|---|--|
| Lombriz de tierra (<i>Eisenia foetida</i>) | Pequeño tamaño, uniformemente pigmentadas, altas tasas reproductivas y metabólicas, además poseen altas tasas de consumo, digestión y asimilación de la materia orgánica. | Temperatura: 25°C Contenido de humedad: 80-85% | Materia orgánica en descomposición (restos vegetales, heces de | Los juveniles alcanzan la madurez entre 21-30 días. El ciclo de vida en condiciones óptimas alcanza entre 45-51 días. | Vermicompostaje, alimentación animal |
| Gusano amarillo de la harina (<i>Tenebrio molitor</i> Linnaeus) | Coleóptero de color castaño de oscuro de cuerpo compacto con bordes paralelos. | Temperatura de incubación: 18-20°C Temperatura desarrollo larval: 25°C | Cereales y granos, subproductos de la molienda, harinas, semillas, insectos muertos y demás. | La etapa de incubación dura entre 10-12 días, mientras que su ciclo de vida dura entre 280-600 días. | Alimentación de animales monogástricos |
| Grillo común (<i>Acheta domesticus</i>) | Grillo marrón amarillento claro de 16 a 21 mm de largo con alas que cubren su abdomen | Temperatura: 29°C | Residuos vegetales | Su ciclo de vida es de aproximadamente de 3 meses, consta de 3 fases: huevo, ninfa y adulto. | Alimento de animales, producción de harina |

| | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|
| Mojojoy (<i>Rhynchophorus palmarum</i>) | Posee una estructura en forma de C, su cuerpo es de color blanco, robusto y blando | Temperatura: 23-26°C | Estiércol, humus, material vegetal | Su ciclo de vida en largas temporadas secas y con temperatura alta es de 4 a 6 meses, mientras que regiones con temporadas secas cortas es de 2 a 3 meses. | Proteína |
| Mosca doméstica (<i>Musca domestica</i>) | Tiene la capacidad de nutrirse de cualquier tipo de materia orgánica, su reproducción es eficaz, se considera como una plaga universal. | Temperatura: 20-30°C | Material vegetal y animal | El ciclo de vida consta de distintos estadios, huevo, larva, pupa y adulto. En condiciones óptimas su desarrollo se completa entre 19 a 21 días | Reducción de residuos orgánicos |
| Mosca soldado negro (<i>Hermetia Illucens</i>) | Son grandes de color negro, su longitud varía entre 12 a 20 mm y se pueden adaptar a diferentes condiciones ambientales. | Temperatura: 27-30°C Humedad: 60-80% | Material vegetal y animal, estiércol, desechos de alimentos | Su ciclo de vida se compone de 5 etapas; huevo, larva, prepupa, pupa y adulto; este dura entre 14 y 21 días. | Reducción de residuos orgánicos, proteína, biodiesel. |

Nota. La figura describe las principales especies de insectos usadas para la degradación de residuos orgánicos, sus características, condiciones óptimas para su desarrollo, alimento, ciclo de vida y aplicaciones.

2. EL MOCHUELO BAJO Y SUS RESIDUOS

El barrio Mochuelo Bajo ubicado en la zona rural de la localidad 19 de Bogotá, Ciudad Bolívar, tiene una participación de 8,62% en el suelo rural de la localidad y un área total de 828,54 hectáreas. Mochuelo Bajo limita al norte y oriente con el área urbana de la localidad, al sur con la Vereda Mochuelo Alto y al occidente con las Veredas Quiba Alta y Quiba Baja [44].

Mochuelo Bajo en sus inicios se consideraba como una zona con mayor extensión rural, sin embargo, la gran cantidad de hectáreas disponibles para ser usadas permitieron una transformación del territorio hacia lo urbano por medio de la formación de ladrilleras y canteras además del Parque Minero Industrial del Mochuelo que ocupa una parte de la zona y del relleno Sanitario Doña Juana que se ubica entre los barrios Mochuelo Bajo y Mochuelo Alto [45].

Este territorio se ha caracterizado por las afectaciones tanto sociales como ambientales que se han ido generando a partir de las actividades industriales realizadas en la zona. La explotación minera ha tenido como consecuencias la pérdida de la cobertura vegetal, generación de material particulado, dióxido de azufre, monóxido de carbono y dióxido de carbono, cambios en la geomorfología del suelo, afectación a las fuentes hídricas de la zona, proliferación de asentamientos informales, empleo informal, entre otros [46].

El relleno Sanitario Doña Juana ha sido un tema controversial desde su fundación por las repercusiones que ha tenido sobre la zona en donde se encuentra ubicado como en la población que habita en sus alrededores. Está ubicado entre los barrios Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo en la localidad de Ciudad Bolívar; su área total es de 623 hectáreas y actualmente recibe residuos de Bogotá y municipios aledaños como Cáqueza, Choachí, Chipaque, Fosca y Gutiérrez, Ubaque y Une; en promedio recibe 6.368 Ton/día y 194.000 Ton/mes [3].

La población aledaña al relleno ha sido obligada a adaptarse a los efectos que ha generado este como la pérdida de biodiversidad, malos olores, emisión de gases, inestabilidad del suelo por el movimiento de tierras, contaminación por parte de lixiviados a quebradas y al río Tunjuelo además de enfermedades por presencia y generación de vectores [46].

Dentro del Mochuelo Bajo, además de generarse residuos ordinarios y orgánicos por parte de la comunidad, la industria ladrillera y minera que habita en el sector produce escombros y residuos peligrosos, los cuales son el resultado de las acciones de la maquinaria implementada durante los procesos. Para el año 2012 la comunidad expresaba que dentro del territorio no se había implementado ningún plan de separación de residuos o tratamientos de aprovechamiento para estos [47]; sin embargo, por medio de la comunidad se llevaron a cabo las primeras rutas selectivas de residuos inorgánicos dentro de la zona en el año 2014 a través de SINEAMBORE (Sinergia para un ambiente sano con bogotanos reciclando), una asociación básica de reciclaje que otorga una solución a la zona aledaña al Relleno Sanitario Doña Juana, esta nace a partir del reconocimiento de las experiencias sobre recuperación y aprovechamiento de residuos por parte de la comunidad del Mochuelo Bajo [48].

2.1 Residuos del Mochuelo Bajo

La asociación SINEAMBORE busca dignificar el trabajo de los recicladores creando rutas de recolección selectivas de residuos aprovechables (orgánicos) dentro de la zona aledaña; con base en esto se crea “La ruta fuerte”, la cual consiste en un recorrido dentro del barrio Mochuelo Bajo en donde se recogen los residuos que generan alrededor de 800 familias que habitan el lugar con el objetivo de ser tratados y disminuir la carga del relleno [49].

Entrando a Mochuelo Bajo se encuentra la primera planta piloto distrital de aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos orgánicos (Figura 7) en conjunto con la asociación SINEAMBORE y la UAESP; esta cuenta con la capacidad de procesar 720 toneladas de residuos al año [48]. Dentro de la planta se reciben residuos orgánicos que no hayan pasado por procesos o actividades de tipo industrial que puedan tener características de peligrosidad (Corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable, infeccioso y/o radiactivo), esto según el Decreto 4741 del ministerio de ambiente del 2005 [50].

Figura 7.

Planta piloto de tratamiento de residuos sólidos orgánicos



Nota. La figura muestra la Planta piloto distrital de aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos en el barrio Mochuelo Bajo en la localidad de Ciudad Bolívar.

Dentro de los residuos que se pueden tratar en la planta están los residuos orgánicos de frutas y verduras de las unidades familiares del mochuelo, residuos orgánicos separados provenientes de restaurantes, colegios, cascos de empresas y demás, alimentos vencidos o deteriorados, restos de cosechas agrícolas, podas de jardín, estiércol de crianza de animales (vacunos, porcinos, equinos, conejos, etc.), residuos de madera (aserrín y/o viruta), restos de comida preparada, entre otros. Los residuos previamente revisados y analizados ingresan a la planta y se acumulan en pilas o hileras (Figura 8) dependiendo su tiempo de maduración y proceso a aplicar, ya que dentro de la planta de tratamiento los residuos se aprovechan por medio de compostaje o lombricultura.

Figura 8.

Hileras de compostaje de biorresiduos



Nota. La figura muestra las hileras que se forman de residuos orgánicos dentro de la planta de tratamiento y aprovechamiento de reasiduos orgánicos para su posterior tratamiento de compostaje.

Los recorridos que realiza “La ruta fuerte” dentro del barrio Mochuelo Bajo permite una entrada constante de residuos a la planta y un mínimo tiempo de descomposición dentro de esta, gracias a esto se obtuvieron residuos frescos por medio de la asociación para el proceso de descomposición y transformación a partir de la larva de mosca soldado negro (*Hermetia Illucens Sp.*).

Para la recolección de residuos frescos dentro de la planta se elaboró un plan de muestreo (*Anexo 1. Protocolo para la recolección y almacenamiento de residuos orgánicos*) por medio del método de cuarteo con el objetivo de obtener una muestra lo más representativa y homogénea posible de los residuos presentes dentro de la planta, para esto se inició con una toma de muestra en la pila 1 de activación en donde se obtuvo 29,97 Kg (Figura 9).

Figura 9.

Recolección de biorresiduos dentro de la planta de tratamiento de residuos orgánicos.



Nota. En la figura se puede observar la toma de residuos orgánicos de las pilas de compostaje y su posterior pesaje.

Posterior a la toma de la muestra se procedió a realizar el método de cuarteo en donde se seleccionaron dos cuadrantes en diagonal (Figura 10) para realizar una segunda etapa de cuarteo (Figura 11) y así obtener una muestra final de residuos orgánicos, además de esto se hizo una separación de acuerdo al tipo de residuo encontrado (lignocelulósico, cascaras de huevo, cascaras de frutas, tubérculos, verduras y demás) con la finalidad de desechar el material que no era óptimo para llevar a cabo el proceso de transformación de biomasa a partir de MSN.

Figura 10.

Primera etapa de proceso de cuarteo para la recolección de residuos



Nota. En la figura se puede apreciar el método de cuarteo para llevar a cabo el muestreo de los residuos orgánicos encontrados en la planta de tratamiento de residuos orgánicos.

Figura 11.

Segunda etapa de proceso de cuarteo para la recolección de residuos



Nota. En la figura se puede apreciar la segunda etapa del método de cuarteo para llevar seleccionar los residuos orgánicos que serán implementados en el proceso de biodegradación de residuos con MSN.

Luego de llevar a cabo la repetición del proceso de cuarteo, se procedió a pesar los residuos y a almacenar con pilas refrigerantes para que estos pudieran mantenerse en estado fresco, del proceso de muestreo por el método de cuarteo en la planta piloto de tratamiento de residuos sólidos orgánicos se obtuvieron 17,25 Kg de residuos orgánicos (Figura 12).

Figura 12.

Pesaje final de residuos orgánicos seleccionados



Nota. En la figura se observa el pesaje final de los residuos orgánicos seleccionados a través del método de cuarteo.

2.2 Condiciones climáticas del Mochuelo Bajo

Las condiciones climáticas y ambientales de una zona son fundamentales para que un proceso de transformación biológica sea exitoso; factores como la humedad relativa y la temperatura inciden directamente en la eficiencia y desarrollo del proceso, en este caso los factores mencionados anteriormente son vitales para el crecimiento y desarrollo de la larva de mosca soldado negro. A pesar de que esta especie tiene la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones climáticas su periodo de crecimiento y tamaño se ven directamente influenciados por estos afectando así el porcentaje de bioconversión, la tasa de supervivencia, la talla de las larvas y demás.

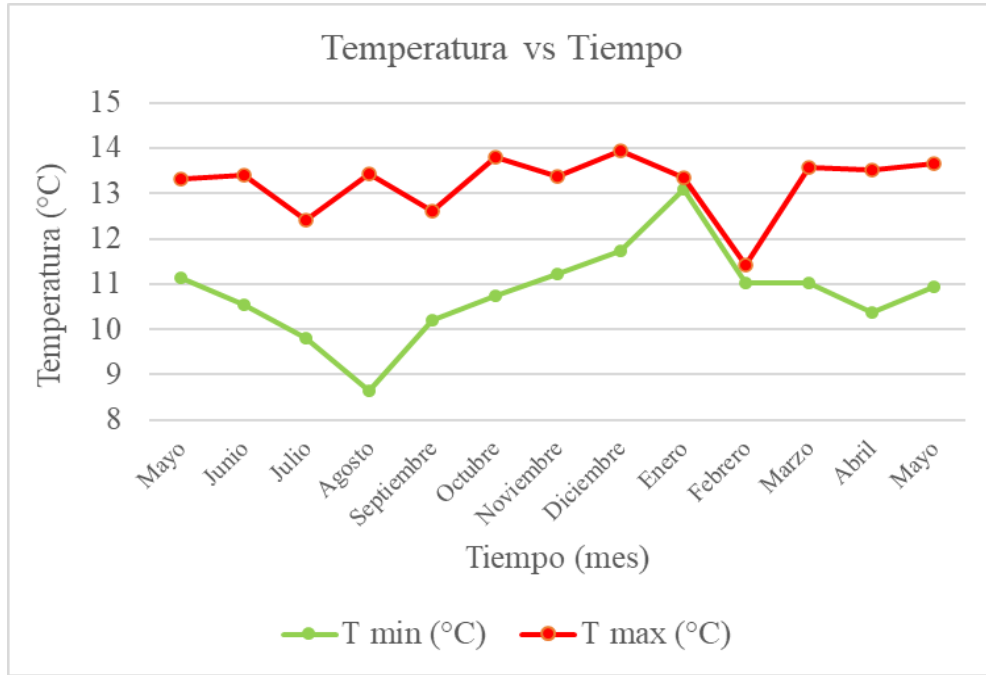
La zona de Mochuelo Bajo se encuentra en la localidad de Ciudad Bolívar, esta ocupa terrenos comprendidos entre una altitud de 2.400 metros sobre el nivel del mar (msnm) en la parte más baja y 3.100 msnm en la parte más alta, clasificándose así dentro del piso térmico frío [51].

Por medio de la Red Hidrometereológica de Bogotá se pudo analizar la variación en cuanto a temperatura y humedad relativa en el sector de Mochuelo Bajo, esto se realizó a través de los datos obtenidos por medio de la página web del Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y Cambio Climático. Los datos empleados fueron tomados por la estación hidrometereológica Doña Juana 2120630 perteneciente a las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) ubicada en la cuenca del río Tunjuelo. Esta estación es de tipo climatológica principal (Cp), por lo cual posee pluviómetro, pluviógrafo y psicrómetro; por medio de esto, la estación logra medir precipitación, temperatura y humedad relativa.

Para el análisis de temperatura en el sector de Mochuelo Bajo se tomaron los datos anuales desde mayo de 2021 hasta mayo de 2022 (Figura 13), a partir de esto se observó que la temperatura mínima de la zona en estudio fue de 8,65°C durante el mes de agosto, mientras que la temperatura máxima que se dio fue de 13,95°C durante el mes de diciembre.

Figura 13.

Variación anual de la temperatura en la zona de Mochuelo Bajo

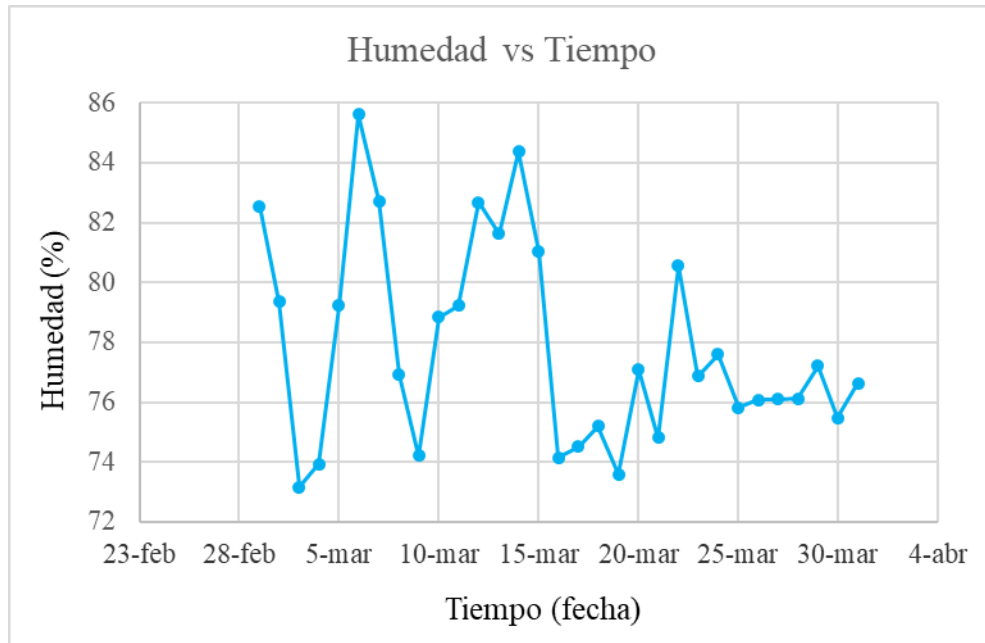


Nota. La figura 13 representa la variación anual de la temperatura en la zona del Mochuelo Bajo teniendo en cuenta los valores mínimos y máximos de temperatura cada mes.

En cuanto a la humedad relativa, se analizaron los datos provistos por la estación hidrometereológica Doña Juana en un periodo mensual, específicamente del mes de marzo de 2022 (Figura 14), época en donde se recogieron los residuos orgánicos de la asociación SINEAMBORE. Se registró un valor de humedad relativa mínimo de 73,18% y un valor máximo de humedad relativa de 85,61%.

Figura 14.

Variación mensual de la humedad relativa en la zona de Mochuelo Bajo



Nota. La figura representa la variación de la humedad relativa en el mes de marzo de 2022, época en donde fueron tomados los residuos orgánicos usados en el proceso de degradación de residuos orgánicos con MSN.

Las fluctuaciones significativas que se observan en la figura 14 son resultado de que el mes de marzo es un periodo de transición entre meses donde hay lluvias altas (abril, mayo, octubre y noviembre) y meses relativamente secos o de bajas lluvias (enero, febrero, julio y agosto); debido a esto hay presencia de masas húmedas y secas durante marzo que generan variaciones importantes en cuanto a la humedad relativa del sector.

Como ya se ha mencionado, la temperatura y humedad relativa son factores que afectan de manera directa el desarrollo de *Hermetia Illucens Sp* y los insectos en general; la mosca soldado negro al ser de condición ectotérmica, es decir que depende de fuentes externas para generar su calor, va a variar su calidad de desarrollo según la temperatura ambiente, es decir que el desarrollo de estos será más lento a bajas temperaturas que a altas temperaturas [38]. La temperatura se considera como uno de los factores abióticos más importantes en el desarrollo larval, este puede afectar no solo su tasa de desarrollo como se mencionó anteriormente, sino

también aspectos biológicos del insecto, como la supervivencia, la duración de su vida adulta, el crecimiento, la fecundidad y los parámetros de crecimiento de la población [52].

Holmes [39] determinó que el umbral mínimo de temperatura para un buen desarrollo larval con emergencia a adulto exitosa es a 19°C, sin embargo el tiempo medio de desarrollo de huevo a adulto en esta temperatura fue de 72 días, lo cual extiende significativamente el tiempo de duración del proceso, ya que a temperaturas de 27°C el proceso dura alrededor de 21 días. Otros autores [52] observaron que temperaturas por debajo de 15°C son desfavorables teniendo como resultado la mortalidad de MSN en todas las etapas estudiadas (Larva, prepupa y pupa).

Por medio de lo mencionado anteriormente, se logra identificar que la temperatura ambiente de la zona del Mochuelo Bajo no es favorable para el desarrollo larval; esta zona tiene una media de temperatura ambiente de 12,43°C, valor que está por debajo de cualquier umbral de temperatura mínima mencionado en la bibliografía. Actualmente no se cuentan con registros de larvas de MSN que se hayan desarrollado de manera exitosa a temperaturas similares a los 12°C o que oscilen alrededor de este valor.

En relación a la humedad relativa, estudios mencionados anteriormente indican que hay un desarrollo larval óptimo entre el rango de humedad de 60 a 70%, sin embargo, otros autores mencionan que en condiciones de laboratorio las larvas de MSN se pueden desarrollar entre 50-90% de humedad relativa [30]. A pesar de que el porcentaje de HR de la zona de Mochuelo Bajo pueda llegar a cumplir con los estándares necesarios para el crecimiento de la especie, aun no hay registros de cómo es el desarrollo de esta dentro de fluctuaciones variadas de la humedad, por lo cual no se podría asegurar un porcentaje de éxito dentro del proceso.

Por consiguiente, es necesario la creación de un ambiente favorable que permita un buen desarrollo larval, para esto se opta por la construcción de un biorreactor con el objetivo de garantizar el proceso de bioconversión y así poder analizar el desarrollo y crecimiento de las larvas por medio de la selección de condiciones de operación específicas.

2.3 Selección condiciones de operación y biorreactor

Para llevar a cabo el proceso de transformación de biorresiduos a biomasa larval, se realizó una búsqueda bibliográfica con el objetivo de determinar la temperatura (Figura 15) y el porcentaje de humedad relativa (Figura 16) que va a operar dentro del reactor.

Figura 15.

Revisión bibliográfica de la temperatura óptima para el desarrollo larval

| TÍTULO DEL DOCUMENTO | TEMPERATURA | REFERENCIA |
|---|-------------|------------|
| Threshold temperatures and thermal requirements of black soldier fly <i>Hermetia illucens</i> : Implications for mass production | 30°C | [52] |
| Development of the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) in Relation to Temperature | 27-30°C | [53] |
| Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion | 35°C | [41] |
| Bioconversion efficiencies, greenhouse gas and ammonia emissions during black soldier fly rearing - A mass balance approach | 27 ± 0,5°C | [54] |
| Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates | 27°C | [55] |

Nota. La figura muestra la recopilación bibliográfica de diferentes artículos con respecto a la temperatura empleada para el desarrollo larval.

A partir de los datos suministrados por la revisión bibliográfica se optó por llevar a cabo el cultivo de las larvas de MSN a 27°C.

Figura 16.

Revisión bibliográfica del porcentaje óptimo de humedad relativa para el desarrollo larval

| TÍTULO DEL DOCUMENTO | HR | REFERENCIA |
|---|---------|------------|
| Relative Humidity Effects on the Life History of <i>Hermetia illucens</i> (Diptera: Stratiomyidae) | 60-70% | [40] |
| Development of the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) in Relation to Temperature | >60% | [53] |
| Bioconversion efficiencies, greenhouse gas and ammonia emissions during black soldier fly rearing - A mass balance approach | 70 ± 5% | [54] |
| Effects of waste stream combinations from brewing industry on performance of Black Soldier Fly, <i>Hermetia illucens</i> (Diptera: Stratiomyidae) | 70 ± 2% | [56] |
| The Impact of Diet Protein and Carbohydrate on Select Life-History Traits of The Black Soldier Fly <i>Hermetia illucens</i> (L.) (Diptera: Stratiomyidae) | 70% | [57] |

Nota. La figura muestra la recopilación bibliográfica de diferentes artículos con respecto al porcentaje de humedad relativa empleado para el desarrollo larval.

A partir de un análisis de resultados respectivos a cada documento revisado, se definió que el porcentaje de humedad relativa para operar el reactor más adecuado es de 70%.

2.4 Biorreactor

La construcción del biorreactor se realizó con el apoyo de estudiantes de Ingeniería Mecatrónica de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central La Salle en la parte mecánica y eléctrica del sistema de operación.

El biorreactor se diseñó a partir de una nevera de icopor de 40 L de dimensiones de 76,5 cm x 56 cm x 56,5 cm (largo x ancho x alto) con una estructura interna de madera de dimensiones de que permita soportar las 12 bandejas que contienen el sustrato de engorde proporcionado a las larvas cada bandeja tiene dimensiones de 21 cm x 17 cm x 7 cm (largo x ancho x alto) con un área de 357 cm² (Figura 17).

Figura 17.

Recipiente empleado como bandeja para el desarrollo larval

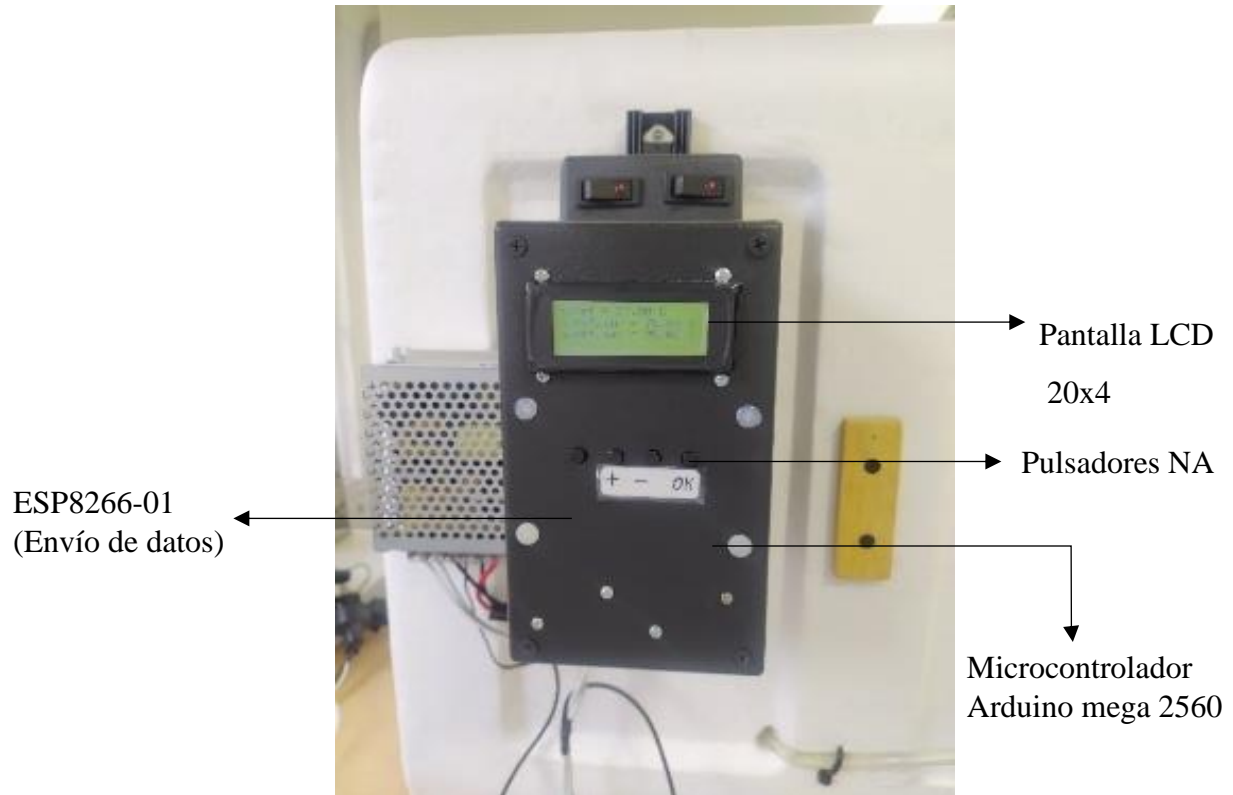


Nota. En la figura se puede observar las dimensiones de las bandejas empeladas en el proceso de degradación de residuos con MSN.

El sistema de control del reactor consiste en un sensor DHT11 para la humedad, un sensor MQ135 para la calidad del aire, una termocupla tipo K con MAX6675 para determinar el valor de la temperatura, un ESP8266-01 para el envío de datos, un microcontrolador de tipo Arduino mega 2560 y unos actuadores como un servomotor SG90, ventilador de 12V, un dámper, un transductor ultrasónico, una placa calefactora de 1000W y una pantalla LCD 20x4; en la Figura 18 y la Figura 19 se pueden observar los elementos mencionados anteriormente.

Figura 18.

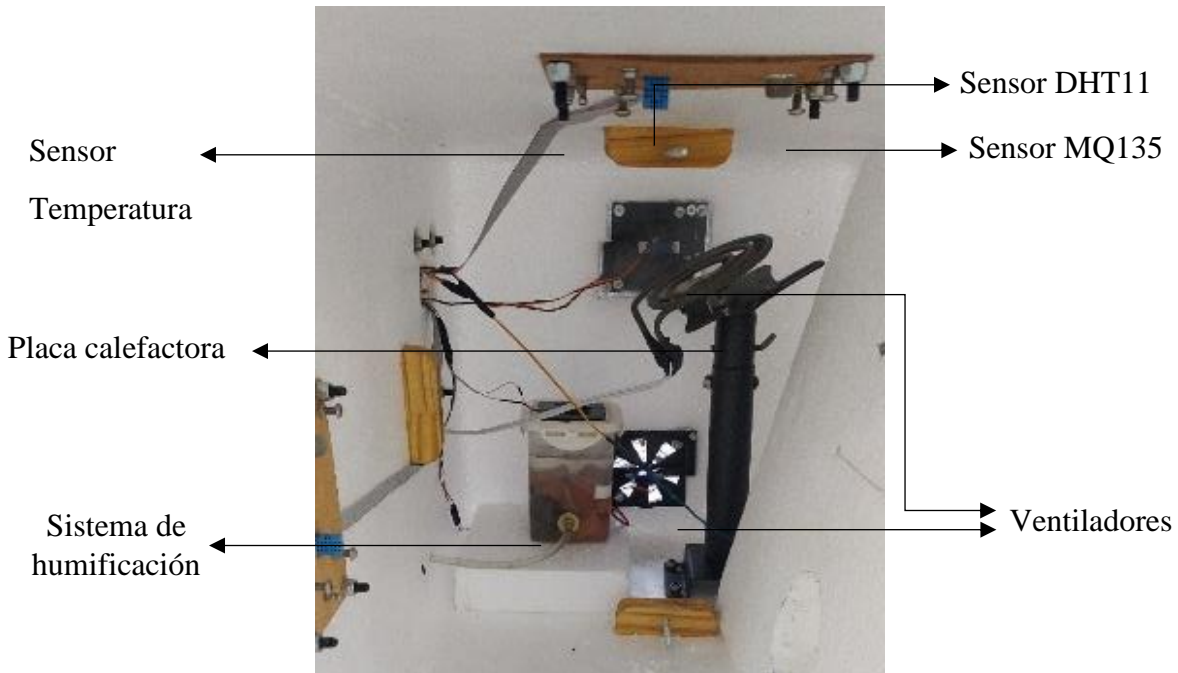
Implementos externos del biorreactor



Nota. En la figura se puede observar los elementos externos del biorreactor que permiten la traducción de los datos recibidos por el sensor para su posterior lectura.

Figura 19.

Implementos internos del biorreactor



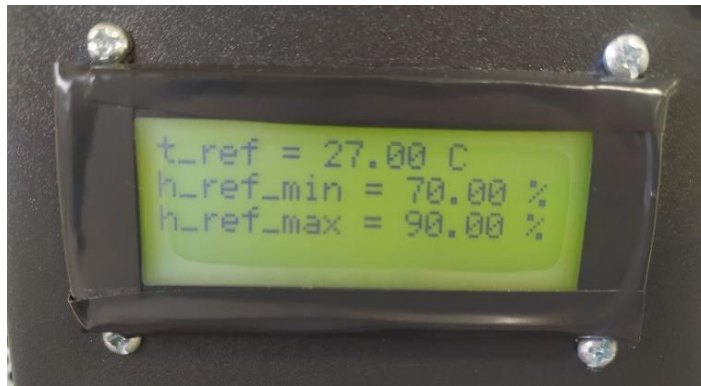
Nota. En la figura se puede observar los elementos internos del biorreactor que el control de las variables (Temperatura, humedad, aireación, entre otras).

En cuanto a las partes que conforman el reactor, se añadió en el interior de este un sistema de humidificación que permite controlar el nivel de humedad relativa adecuado para el crecimiento y desarrollo de las larvas de MSN, además de este, se agregó un sistema de aireación por medio de ventiladores y un servomotor para asegurar un suministro constante de oxígeno dentro del reactor y se proporcionó una placa calefactora que pueda suministrar el calor requerido para las larvas y así controlar la variable de temperatura a lo largo del proceso. En cuanto a los sensores empleados, son de tipo digital que permite la salida de los datos para su registro y manejan diferentes rangos de medición según lo requerido. Además, el sensor de calidad del aire es apropiado para detectar NH_3 , NO_x , alcohol, benceno, humo, CO_2 y demás.

Luego de asegurar el funcionamiento adecuado del biorreactor, se procedió a establecer los valores seleccionados de las variables de temperatura y humedad relativa, esto se puede observar en la Figura 20.

Figura 20.

Variables establecidas para el proceso de degradación de biorresiduos en el interior del biorreactor



Nota. En la figura 20 se puede observar las variables establecidas por medio de una pantalla LCD 20x4 (Temperatura y humedad relativa) a partir de las revisiones bibliográficas.

Es importante resaltar que al biorreactor se le implementó un sistema de emisión de los datos tomados por medio de los sensores implementados (Humedad, temperatura y calidad del aire) a través de la plataforma virtual *phpMyAdmin*, la cual permite visualizar los valores emitidos en un intervalo determinado de tiempo.

3. CARACTERIZACIÓN DE SUSTRATO

Para el desarrollo del proceso de biodegradación de residuos a través de la larva de MSN es fundamental realizar una caracterización del sustrato (biorresiduos) que se va a emplear como medio de alimento; en primera medida, se procede a realizar una revisión bibliográfica de los diferentes tipos de sustratos empleados en la alimentación de larvas MSN (Figura 21) con el objetivo de poder seleccionar el alimento y comparar el desarrollo larval, el crecimiento, el porcentaje de bioconversión y demás con diferentes tipos de sustratos y poder determinar cuál fue el de mayor éxito al final del proceso. Cabe aclarar que, de los sustratos empleados, solamente se analizará el contenido de proteína en las larvas de MSN alimentadas con los biorresiduos de la asociación SINEAMBORE.

Figura 21.

Revisión bibliográfica de los diferentes tipos de sustratos usados para la alimentación larval.

| TÍTULO DEL DOCUMENTO | SUSTRATO | REFERENCIA |
|--|--|-------------------|
| Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion | Residuos de alimentos de preconsumo y posconsumo | [41] |
| Process efficiency and greenhouse gas emissions in black soldier fly larvae composting of fruit and vegetable waste with and without pre-treatment | Cáscaras de naranja y recortes de brócoli y coliflor | [58] |
| Characteristic of Fatty Acids Biotransform from <i>Hermetia Illucens</i> Prepupae Fed with Various Organic Wastes Before Conversion to Methyl Ester Form | Residuos de alimentos | [59] |
| Effect of feeding strategy on the protein and fatty acid contents of black soldier fly prepupae (<i>Hermetia illucens</i>) for the potential applications as animal feed and promising alternative protein-rich food | Residuos de alimentos | [60] |

Nota. La figura muestra la recopilación bibliográfica de diferentes artículos con respecto a los sustratos empleados en diferentes ensayos para la alimentación larval.

A partir de la revisión bibliográfica realizada sobre los tipos de residuos empleados en el proceso de transformación, se opta por emplear 4 tipos de sustratos; residuos frescos (antes de consumo), residuos cocidos (después de consumo), residuos animales y residuos de césped y poda. La composición de cada tipo de sustrato y su origen se pueden observar en la Figura 22.

Figura 22.

Origen y composición de los sustratos usados en el proceso de degradación de biorresiduos con MSN.

| TIPO DE RESIDUO | COMPOSICIÓN | ORIGEN |
|------------------------|--|---|
| Frescos | Cáscaras de huevo, hojas de mazorca, cáscaras de frutas (piña, maracuyá, mandarina, naranja, papaya, sandía, plátano), tubérculos (papa, yuca, guatila, arracacha), cebolla, verduras. | Planta piloto de tratamiento de residuos orgánicos - SINEAMBORE - Mochuelo Bajo |
| Cocidos | Arroz, pasta, garbanzos, pescado, zanahoria, arveja. | Restaurantes |
| Césped y poda | Hojas secas y césped fresco. | Zonas Bogotá |
| Animales | Piel de pollo, grasa de res y cerdo y restos de cortes. | Plaza Distrital de Mercado Quiriguá |

Nota. La figura indica los principales desechos de alimentos que hay dentro de los sustratos seleccionados y el lugar de origen de cada uno de estos.

Es fundamental establecer el valor de humedad del sustrato adecuado para el crecimiento de las larvas, para esto se realizó una revisión bibliográfica por medio de artículos (Figura 23) por medio de la cual se seleccionó un rango del porcentaje de contenido de humedad entre 60 – 80%; este rango se establece principalmente por la variedad de sustratos que se van a emplear durante el proceso ya que por la naturaleza de estos se pueden generar diferencias significativas dentro del contenido de humedad; también se tiene en cuenta que probablemente la humedad del sustrato va a disminuir dentro del reactor, por lo cual se opta por manejar un amplio rango que a su vez permite un óptimo desarrollo larval.

Figura 23.

Revisión bibliográfica del contenido de humedad del sustrato usado para la alimentación de las larvas de MSN.

| TÍTULO DEL DOCUMENTO | CONTENIDO DE HUMEDAD | REFERENCIA |
|---|----------------------|------------|
| Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion | 70-75% | [41] |
| Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates | 60% | [55] |
| Development of the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) in Relation to Temperature | 70% | [53] |
| The Impact of Diet Protein and Carbohydrate on Select Life-History Traits of The Black Soldier Fly <i>Hermetia illucens</i> (L.) (Diptera: Stratiomyidae) | 70% | [57] |
| Material flow analysis and life cycle assessment of food waste bioconversion by black soldier fly larvae (<i>Hermetia illucens</i> L.) | 62% | [61] |

Nota. La figura muestra la recopilación bibliográfica de diferentes artículos con respecto al contenido de humedad del sustrato empleado para la alimentación larval.

A partir de esto, se describirá a continuación cada sustrato, sus propiedades, pre tratamientos y análisis fisicoquímicos que se les realizaron (Humedad, cenizas, sólidos volátiles, densidad y pH).

3.1 Residuos frescos

Son aquellos residuos que se generan antes de la preparación de los alimentos, como frutas, verduras, cáscaras de frutas y verduras, restos de hortalizas y tubérculos, residuos de preparación de jugos y demás. Como se mencionó anteriormente, este tipo de residuos se obtuvo

directamente de la zona de Mochuelo Bajo en conjunto con la Asociación SINEAMBORE. Posterior a su obtención, se procedió a realizar una caracterización de los residuos que se seleccionaron, por medio de esta se evidenció principalmente que contenían restos de papa, cebolla, cáscaras de frutas y hojas de mazorca; esto se puede observar en la Figura 24.

Figura 24.

Composición de los residuos frescos obtenidos de la planta de tratamiento de residuos orgánicos en El Mochuelo Bajo.

| RESIDUOS | COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES |
|---------------------------------------|---|
| Tubérculos | Dentro de su composición predominan los hidratos de carbono complejos como el almidón, por lo cual son una fuente de energía significativa, adicional a esto, aportan fibra y minerales como el potasio, además de una pequeña carga de proteína. |
| Cáscaras de frutas y vegetales | Son una fuente importante de fibra, además poseen compuestos antioxidantes y porcentajes de proteína. |
| Cáscaras de huevo | Se considera como una fuente importante de proteína y minerales como calcio, magnesio, zinc, hierro, entre otros. |
| Hojas de mazorca | Fuente de celulosa, lignina y holocelulosa. |
| Frutas y verduras | Son fuente de vitaminas, minerales (potasio, hierro, calcio, magnesio, sílice, zinc, sulfatos, fosfatos, cloruros), además aportan fibra (Celulosa). |

Nota. En la figura se puede evidenciar los principales componentes de los diferentes desechos del sustrato de residuos frescos.

Luego de la inspección de la muestra seleccionada de residuos, se realizó un acondicionamiento del sustrato, el cual consiste en la trituración y deshidratación de los residuos. El proceso de trituración se realiza con el objetivo de disminuir el tamaño de partícula para que sea de fácil acceso para las larvas ya que no cuentan con piezas bucales adecuadas para digerir grandes partículas, además, también se realiza con la finalidad de homogeneizar el sustrato y mejorar el acceso a los nutrientes que lo componen; este proceso se debe realizar con cualquier

tipo de sustrato que tenga como finalidad la alimentación larval. La trituración se llevó a cabo con una trituradora de alimentos.

Posterior al proceso de trituración, se da paso a la etapa de deshidratación; Dortmans, Diener, Verstappen y Zurbrügg [62] indican que si al apretar un puñado de residuos menos de unas pocas gotas de agua caen el contenido de humedad es inferior al 60% y se debe añadir agua, de lo contrario se deberá deshidratar la muestra. En el caso de los residuos frescos, se evidenció un contenido de agua superior a unas pocas gotas, por lo cual se decidió realizar la deshidratación por medio de una técnica manual y el método de deshidratación pasiva (por gravedad) como se observa en la figura 25, en donde se emplea tela de tipo gabardina como medio filtrante permitiendo que el agua drene a través de esta hacia un recipiente; como residuo final de la deshidratación se obtuvo 1242,72 ml de lixiviados.

Figura 25.

Deshidratación pasiva de residuos.



Nota. En la figura 25 se observa cómo se lleva a cabo el método de deshidratación de residuos por gravedad para retirar el exceso de agua.

Después de la deshidratación, se seleccionan 300 gramos para enviar a AGRILAB y realizar dos tipos de análisis, “Caracterización y composición de materiales orgánicos sólidos” y “Análisis bromatológico especial”, esto se hace con el objetivo de tener una referencia al momento de comparar los resultados que se obtienen de forma experimental en cuanto a humedad, cenizas, sólidos volátiles, densidad y pH, ya que al ser residuos de una zona específica

que no se han estudiado y/o analizado no existen datos en la literatura que permitan realizar una comparación. En cuanto a los demás tipos de sustratos (Animales, cocidos y césped y poda) se tomó como referencia datos obtenidos de la literatura para realizar la comparación de los mismos parámetros mencionados anteriormente en relación a los obtenidos de forma experimental.

Los diferentes procedimientos empleados para el desarrollo de las pruebas fisicoquímicas se pueden observar en el *Anexo 2. Caracterización y composición de biorresiduos*; estos se aplicaron para los 4 tipos de biorresiduos seleccionados (Frescos, cocidos, animales y césped y poda).

Los resultados obtenidos para residuos frescos de manera experimental en cada uno de los análisis se expresan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Caracterización de residuos orgánicos domésticos – residuos frescos.

| RESIDUOS ORGÁNICOS DOMÉSTICOS | |
|--|------------------|
| ANÁLISIS | RESULTADO |
| Humedad (%) | 78,06 ± 0,24 |
| Cenizas (%) | 5,06 ± 0,61 |
| Pérdidas por volatilización (g) | 2,80 ± 1,76E-03 |
| pH | 5,48 ± 1,32E-04 |
| Densidad (g/cm³) | 0,82 ± 5,98E-04 |
| Grasa (%) | 11,42 ± 0,35 |

Nota. La tabla 1 muestra los valores obtenidos a partir de los análisis experimentales realizados a los residuos frescos para establecer una caracterización de estos.

Los resultados obtenidos por AGRILAB en cuanto a la caracterización se pueden observar en la Tabla 2, en cuanto a la composición de la fracción mineral, los valores se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 2.*Caracterización y composición de residuos frescos.*

| VARIABLE | RESULTADO | UNIDADES | TÉCNICA |
|--|------------------|-------------------|----------------------------|
| Humedad | 77,1 | % | NTC 5167 - Gravimétrico |
| pH | 5,83 | Unidades de pH | NTC 5167 - Potenciométrico |
| Conductividad eléctrica | 17,3 | dS/m | NTC 5167 - Potenciométrico |
| Cenizas | 5,21 | % | NTC 5167 - Gravimétrico |
| Pérdidas por volatilización | 17,7 | % | NTC 5167 - Gravimétrico |
| Densidad real (BS) | 0,477 | g/cm ³ | NTC 5167 - Gravimétrico |
| Carbono orgánico oxidable total | 7,13 | % | NTC 5167 - Colorimétrico |
| Relación C/N | 17 | Adimensional | Relación matemática |

Nota. La tabla 2 muestra los valores de la caracterización y composición realizados a los residuos frescos por parte de AGRILAB.

Tabla 3.*Caracterización de la fracción mineral de residuos frescos.*

| VARIABLE | RESULTADO | UNIDADES | TÉCNICA |
|---------------------------|------------------|-----------------|---|
| Nitrógeno Total | 0,408 | % | - |
| Nitrógeno Orgánico | 0,408 | % | NTC 370 - Volumétrico |
| Fósforo Total | 0,178 | % | NTC 234 - Colorimétrico |
| Potasio Total | 0,64 | % | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Calcio Total | 2,78 | % | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Magnesio Total | 0,114 | % | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Azufre Total | 0,053 | % | NTC 1154 / Colorimétrico |
| Hierro Total | 0,101 | % | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |

| | | | |
|------------------------|-------|-------|---|
| Manganeso Total | 17,5 | mg/kg | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Cobre Total | 4,4 | mg/kg | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Zinc Total | 15,7 | mg/kg | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Boro Total | 9,61 | mg/kg | NTC 1860 - Colorimétrico |
| Sodio Total | 0,036 | % | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |

Nota. La tabla 3 muestra los valores de la caracterización de la fracción mineral de los residuos frescos por parte de AGRILAB.

3.2 Residuos cocidos

Hacen referencia a los residuos que quedan posteriormente al proceso de cocción y que no son ingeridos o aprovechados en su totalidad. Principalmente están conformados por granos y cereales, verduras y proteína de tipo animal como carne, pollo y/o pescado (Figura 26).

Figura 26.

Composición y propiedades de los residuos cocidos.

| RESIDUOS | COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES |
|-------------------------------------|--|
| Granos, Cereales y Legumbres | Principalmente están conformados por hidratos de carbono y fibra, además de proteínas, vitaminas B1 y B2 y algunos minerales como calcio y hierro. |
| Vegetales | Son una fuente importante de fibra, además poseen compuestos antioxidantes y porcentajes de proteína. |
| Proteína Animal | Se caracteriza por ser una fuente rica en aminoácidos esenciales, además de algunos minerales y vitaminas. |

Nota. La figura muestra la composición de los residuos cocidos y sus principales propiedades.

Posterior a la caracterización de los residuos se realizó el pre tratamiento necesario para su adecuación; en este caso, se trituró el sustrato para mejorar la accesibilidad a este, adicional a esto, se realizó la revisión de su contenido de humedad de igual manera que con los residuos

frescos, en este caso, se obtuvieron pocas gotas por lo cual se decidió no hacer una deshidratación del sustrato. Finalmente se procedió a realizar los procesos de caracterización de la muestra explicados paso a paso en el *Anexo 2. Caracterización y composición de biorresiduo*; los valores obtenidos en los procedimientos se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4.

Caracterización de residuos cocidos posconsumo.

| RESIDUOS COCIDOS | |
|--|------------------|
| ANÁLISIS | RESULTADO |
| Humedad (%) | 71,84 ± 0,08 |
| Cenizas (%) | 1,03 ± 3,1E-03 |
| Pérdidas por volatilización (g) | 1,82 ± 7,06E-04 |
| pH | 6,20 ± 2,40E-03 |
| Densidad (g/cm³) | 1,15 ± 5,35E-03 |
| Grasa (%) | 35,52 ± 0,61 |

Nota. La tabla 4 muestra los valores obtenidos a partir de los análisis experimentales realizados a los residuos cocidos posconsumo para establecer una caracterización de estos.

3.3 Residuos cárnicos

Estos residuos se obtuvieron de la Plaza Distrital de Mercado Quirigua. Principalmente están compuestos de piel de pollo, cortes de grasa de res y cerdo y residuos de los cortes de carne de cerdo y res. Este tipo de residuos se caracteriza por su alto nivel de grasa en comparación con el nivel de proteína, debido a que son residuos que no son de alto valor. Para su caracterización, se aplicó el *Anexo 2. Caracterización y composición de biorresiduo*, el cual arrojó los resultados evidenciados en la Tabla 5.

Tabla 5.*Caracterización de residuos animales crudos (Cárnicos).*

| RESIDUOS CÁRNICOS | |
|--|------------------|
| ANÁLISIS | RESULTADO |
| Humedad (%) | 48,92 ± 13,62 |
| Cenizas (%) | 4,64 ± 2,28 |
| Pérdidas por volatilización (g) | 2,35 ± 5,93E-03 |
| pH | 6,87 ± 1,16E-03 |
| Densidad (g/cm³) | 0,95 ± 2,36E-03 |
| Grasa (%) | 41,15 ± 0,67 |

Nota. La tabla 5 muestra los valores obtenidos a partir de los análisis experimentales realizados a los residuos cárnicos para establecer una caracterización de estos.

3.4 Residuos de poda y césped

Este tipo de residuos son el resultado de el corte de césped, actividades de jardinería y demás. La muestra empleada dentro del proyecto se obtuvo de los residuos generados por el servicio de CLUS – Costo de limpieza urbana por suscriptor en la ciudad de Bogotá. Para su caracterización se aplicó el *Anexo 2. Caracterización y composición de biorresiduo*, los resultados se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6.*Caracterización de residuos de poda y césped.*

| RESIDUOS DE PODA Y CÉSPED | |
|--|------------------|
| ANÁLISIS | RESULTADO |
| Humedad (%) | 60,57 ± 6,33 |
| Cenizas (%) | 7,25 ± 1,30 |
| Pérdidas por volatilización (g) | 0,41 ± 3,85E-04 |
| pH | - |
| Densidad (g/cm³) | - |
| Grasa (%) | 13,03 ± 0,05 |

Nota. La tabla 6 muestra los valores obtenidos a partir de los análisis experimentales realizados a los residuos de poda y césped para establecer una caracterización de estos.

Como se ha mencionado a lo largo del proyecto, el contenido de humedad del sustrato es un factor fundamental dentro del desarrollo del mismo, para esto es importante poder asegurar desde el inicio que el contenido de humedad de cada sustrato está dentro del rango seleccionado, sin embargo, por la naturaleza de cada sustrato se procedió a realizar una comparación del valor de humedad con el objetivo de poder establecer la calidad de este y posteriormente realizar los ajustes necesarios.

Los residuos de comida se caracterizan por tener un alto contenido de humedad, normalmente este se encuentra entre un rango de 50 – 80% [6], lo cual respalda los valores obtenidos tanto para residuos frescos y residuos cocidos con un contenido de humedad respectivo de 78,06 % ± 0,24 y 71,84 % ± 0,08, además de esto, los residuos cárnicos al pertenecer a la categoría de residuos de alimentos también se pueden comparar con este rango, sin embargo, el contenido de humedad de este tipo de residuos se encuentra levemente por debajo del límite inferior del rango empleado al tener un porcentaje de humedad de 48,92 % ± 13,62. Es importante resaltar que la desviación estándar del contenidos de humedad de residuos cárnicos es altamente significativa principalmente por la poca homogeneidad de la muestra empleada; adicional a esto, es notable mencionar el alto contenido de grasa total presente en los residuos cárnicos, 41,15 % ± 0,67 en comparación con los residuos frescos y cocidos que tienen un porcentaje de grasa 11,42 ± 0,35 y 35,52 ± 0,61 respectivamente.

En cuanto a los residuos de césped y poda, el contenido de humedad puede variar entre 30 – 80% [6]. El valor obtenido de contenido de humedad para los residuos de césped y poda recolectados es de $60,57 \pm 6,33$, lo cual coincide con la bibliografía revisada.

Por medio de los valores obtenidos de contenido de humedad se analiza si es necesario realizar un ajuste del valor de esta; dentro de los sustratos implementados, solamente los residuos cárnicos no cumplen con el rango seleccionado de contenido de humedad previamente seleccionado (60 – 80%), debido a esto se añaden 156,48 ml de agua con el objetivo de alcanzar un contenido de humedad del 75%.

4. PROTEÍNA DE LARVA DE MOSCA SOLDADO NEGRO

Con la finalidad de cumplir el último objetivo del proyecto se procede a realizar el diseño de experimentos a partir del cual se va a desarrollar todo el proceso de crecimiento y desarrollo larval; para esto se implemente un análisis de la varianza con un factor (ANOVA) con el fin de comparar los diferentes sustratos empleados. Dentro del diseño experimental se va a establecer la relación C/N como la variable independiente y la cual se va a manipular, además de otras variables de tipo independiente que estarán fijas a lo largo del proceso como la humedad relativa, la temperatura, la densidad larval y el contenido de humedad en el sustrato. Así mismo, se establecen como variables dependientes el peso, la longitud y el ancho de las larvas en el tiempo.

Para esto se plantean dos hipótesis:

Ho: No hay diferencias entre las medias poblacionales: $\mu 1 = \mu 2 = \mu 3 = \mu n$

Hi: Al menos dos medias poblacionales son diferentes

La relación C/N se establece como la variable independiente a manipular por ser un parámetro importante dentro de la degradación de biorresiduos empleando MSN ya que según estudios afecta de manera directa la generación de biomasa larval, además de esto, se ha estudiado que una relación adecuada puede llegar a reducir las pérdidas gaseosas tanto de carbono como de nitrógeno [63]. Dentro del experimento que se llevará a cabo, la relación C/N se manipula por medio del uso de diferentes sustratos con diferentes composiciones y origen; como se mencionó en el capítulo 3 se implementaron residuos frescos, cocidos, animales (cárnicos) y de césped y poda, estos últimos son empleados como la base de una mezcla que incluye además de estos los residuos frescos y cocidos.

En cuanto a la relación C/N de los sustratos empleados, solamente se tiene el valor de esta variable para los residuos frescos, debido a que pasaron por un análisis bromatológico el cual mostró una relación de 17:1, sin embargo, se realizó una caracterización de estos que permite identificar los principales nutrientes presentes dentro de cada uno, además de una revisión bibliográfica de artículos en donde se emplearon sustratos similares a los del presente proyecto, esto se puede observar en las tabla 27 y en la tabla 28.

Figura 27.*Composición de biorresiduos de mezcla de vegetales y frutas.*

| Artículo | Proteína (%) | Lípidos (%) | Carbohidratos (%) | Fibra (%) | Referencia |
|--|---------------------|--------------------|--------------------------|------------------|-------------------|
| Black Soldier Fly Larvae Adapt to Different FoodSubstrates through Morphological and FunctionalResponses of the Midgut | 10,3 | 0,7 | 12,8 | 4,4 | [64] |
| Growth of the Black Soldier Fly <i>Hermetia illucens</i> (Diptera: Stratiomyidae) on Organic-Waste Residues and Its Application as Supplementary Diet for Nile Tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> (Perciformes: Cichlidae) | 15,73 | 2,73 | - | - | [65] |
| Nutritional composition of black soldier fly (<i>Hermetia illucens</i>) prepupae reared on different organic waste substrates | 8,6 | 2,1 | 4,49 | 3,36 | [66] |

Nota. En la figura se muestra una revisión bibliográfica sobre el análisis proximal de residuos de vegetales y frutas.

Figura 28.*Composición de biorresiduos de restaurantes.*

| Artículo | Proteína (%) | Lípidos (%) | Carbohidratos (%) | Fibra (%) | Referencia |
|--|--------------|-------------|-------------------|-----------|------------|
| Nutritional composition of black soldier fly (<i>Hermetia illucens</i>) prepupae reared on different organic waste substrates | 15,7 | 13,9 | 6,18 | 4,1 | [66] |
| Growth of the Black Soldier Fly <i>Hermetia illucens</i> (Diptera: Stratiomyidae) on Organic-Waste Residues and Its Application as Supplementary Diet for Nile Tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> (Perciformes: Cichlidae) | 14,5 | 12,36 | - | - | [65] |
| Impact of Processed Food (Canteen and Oil Wastes) on the Development of Black Soldier Fly (<i>Hermetia illucens</i>) Larvae and Their Gut Microbiome Functions | 26,83 | 9,7 | - | - | [67] |

Nota. En la figura se muestra una revisión bibliográfica sobre el análisis proximal de residuos de alimentos provenientes de restaurantes.

Como se mencionó anteriormente, la densidad larval es una variable independiente que estará fija a lo largo de todo el proceso, para establecer una densidad larval adecuada se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de recopilar los diferentes valores empleados de la relación “número de larvas/área” en diferentes experimentos, esto se puede evidenciar en la Figura 29.

Figura 29.

Revisión bibliográfica de la densidad larval usada en diferentes ensayos.

| TÍTULO DEL DOCUMENTO | DENSIDAD LARVAL | REFERENCIA |
|---|-----------------------------|------------|
| Effects of Larval Density and Feeding Rates on the Bioconversion of Vegetable Waste Using Black Soldier Fly Larvae <i>Hermetia illucens</i> (L.), (Diptera: Stratiomyidae) | 1,2 larvas/ cm ² | [68] |
| Co-composting of banana peel and orange peel waste with fish waste to improve conversion by black soldier fly (<i>Hermetia illucens</i> (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae | 2 larvas/ cm ² | [69] |
| Black soldier fly biorefinery: A novel upcycling route for municipal biosolids | 1 larvas/ cm ² | [33] |

Nota. La figura muestra la recopilación bibliográfica de diferentes artículos con respecto a la densidad larval.

Se calculó el promedio de la densidad larval compilada arrojando un valor de 1,4 larvas/cm², además de esto, se definió que para cada recipiente se va a suministrar 600 gramos de sustrato; a partir de esto podemos calcular el número de larvas que habrá por recipiente teniendo en cuenta el área de cada uno, como se puede observar en la Ecuación 1.

Ecuación 1.

$$No\ Larvas = \text{Área recipiente} * \text{Densidad larval}$$

$$No\ Larvas = 357\ cm^2 * 1,4\ \frac{Larvas}{cm^2}$$

$$No\ Larvas = 499,8 \approx 500$$

Por medio de la ecuación 1 se definió agregar 500 larvas por cada bandeja. Para el diseño de experimentos se fijaron 4 ensayos con 2 réplicas cada uno para un total de 12 ensayos, como se puede observar en la tabla 7.

Dentro de los sustratos empleados, se decide implementar un experimento titulado como mezclas, este se realiza debido a que los residuos de césped y poda no poseen los nutrientes

necesarios para el desarrollo larval, por lo cual se implementa residuos frescos y residuos cocidos que quedaron como sobrante de los experimentos, por lo cual las proporciones de mezclas se obtuvo de manera aleatoria.

Tabla 7.

Diseño de experimentos.

| SUSTRATO | TIPO | BANDEJA | COMPOSICIÓN | MASA SUSTRATO (g) | No Larvas |
|----------------------|---------|---------|-------------|-------------------|-----------|
| RESIDUOS FRESCOS | Ensayo | 1 | 100% RF | 600 g | 500 |
| | Réplica | 2 | | 600 g | 500 |
| | Réplica | 3 | | 600 g | 500 |
| RESIDUOS COCIDOS | Ensayo | 4 | 100% RC | 600 g | 500 |
| | Réplica | 5 | | 600 g | 500 |
| | Réplica | 6 | | 600 g | 500 |
| RESIDUOS CÁRNICOS | Ensayo | 7 | 100% RCAR | 600 g | 500 |
| | Réplica | 8 | | 600 g | 500 |
| | Réplica | 9 | | 600 g | 500 |
| MEZCLAS | Ensayo | 10 | 25% RF | 600 g | 500 |
| | Réplica | 11 | 66% RC | 600 g | 500 |
| | Réplica | 12 | 9% CP | 600 g | 500 |

Nota. En la tabla se evidencia el diseño de experimentos planteado para el proceso. RF – Residuos frescos, RC – Residuos cocidos, RCAR – Residuos cárnicos, CP – Césped y poda.

4.1 Metodología

La metodología llevada a cabo se realizó con el objetivo de poder observar el crecimiento (Largo, ancho y peso) de las larvas en el tiempo, además de analizar el cambio en cuanto a la humedad del sustrato y demás factores importantes para el desarrollo de las larvas como el pH, la temperatura, entre otros. Además de lo mencionado anteriormente, se describe el proceso de sacrificio y obtención de la harina de proteína de larvas de mosca soldado negro. Así mismo, se mide al final del proceso los indicadores de biotransformación de residuos orgánicos empleando larvas de MSN como la tasa de supervivencia, la tasa de bioconversión, la eficiencia de

conversión a proteína, fibra y grasa, el porcentaje de reducción del residuo y la eficiencia en conversión del residuo.

La preparación de las bandejas con el sustrato correspondiente inició con el conteo de las 500 larvas requeridas por cada recipiente para un total de 6000; las larvas usadas en el proyecto (Figura 30) fueron suministradas por el director del presente proyecto, Felipe Correa Mahecha como un insumo propio; estas eclosionaron el 19 de mayo de 2022, estas inicialmente se alimentaron con alimento especial para pollos (Figura 31). Teniendo en cuenta que el inicio del experimento se dio el 23 de mayo, se puede asegurar que las larvas al inicio del experimento tenían 5 días de vida; es importante para el desarrollo del proyecto que las larvas empleadas tengan la misma edad y tamaño lo cual permite una mejor tasa de bioconversión y tiempo de cosecha al final del proceso [62].

Figura 30.

Larvas iniciales.



Nota. En la figura se puede observar las larvas de 5 días de nacidas antes de iniciar el proceso de biodegradación.

Figura 31.

Alimento inicial de las larvas.



Nota. En la figura se aprecia las larvas recién nacidas con el alimento para pollos inicialmente proporcionado.

Posterior al conteo de las larvas, se procedió a disponer los sustratos en su bandeja correspondiente, según la Figura 29, además de esto se agregaron las 500 larvas por recipiente como se puede observar en la Figura 32.

Figura 32.

Sustratos al inicio del proceso de biodegradación.



Nota. La figura muestra los 4 sustratos empleados antes de ingresar al biorreactor para iniciar el proceso de biodegradación.

A cada bandeja empleada se le modificó la tapa y se le añadió una malla con la finalidad de permitir el paso de aire sin que las larvas puedan salir de la bandeja como se ve en la Figura 33, luego se ubicaron todas las bandejas por niveles de acuerdo al sustrato usado en la estructura interna de madera del biorreactor (Figura 21).

Figura 33.

Bandeja usada con el sustrato.



Nota. La figura muestra la bandeja con su abertura y tela empleada para el paso del aire.

Figura 34.

Biorreactor y estructura interna.



Nota. Se observa el biorreactor con la estructura interna y las bandejas usadas.

Para la medición de las variables de control del proceso (humedad, temperatura, pH y % de cenizas) y las medidas de las larvas (peso, ancho y longitud) se planteó un cronograma con los días específicos en que se tomaron los datos, para esto se tuvo en cuenta los días festivos y los fines de semana debido a que en estos días no había servicio en el laboratorio, este se puede observar en la Figura 35.

Figura 35.

Cronograma para toma de muestras y mediciones.

| Día | Fecha | Actividad |
|------------|--------------|--|
| 0 | 23/05/2022 | Inicio del experimento |
| 2 | 25/05/2022 | Medición de larvas y variables de control del sustrato (Humedad y pH) |
| 4 | 27/05/2022 | Medición de larvas y variables de control del sustrato (Humedad, pH y cenizas) |
| 8 | 31/05/2022 | Medición de larvas y variables de control del sustrato (Humedad y pH) |
| 9 | 1/06/2022 | Medición de larvas y variables de control del sustrato (Humedad y pH) |
| 11 | 3/06/2022 | Medición de larvas y variables de control del sustrato (Humedad, pH y cenizas) |
| 14 | 6/06/2022 | Medición de larvas y variables de control del sustrato (Humedad, pH y cenizas) |

| | | |
|-----------|------------|--|
| 16 | 8/06/2022 | Medición de larvas y variables de control del sustrato (Humedad y pH) |
| 18 | 10/06/2022 | Medición de larvas y variables de control del sustrato (Humedad, pH y cenizas) |
| 21 | 13/06/2022 | Medición de larvas y variables de control del sustrato (Humedad, pH y cenizas) y finalización de experimento de cárnicos y mezclas |
| 23 | 15/06/2022 | Medición de larvas y variables de control del sustrato (Humedad, pH y cenizas) y finalización de experimento de frescos y cocidos |
| 25 | 17/06/2022 | Sacrificio de larvas y obtención de harina |

Nota. En la figura se muestran los días en que se hará medición de las larvas y de las variables de control del proceso.

Para realizar la medición de las larvas se tomó como referente metodológico a Villa [33], sin embargo, se realizó una modificación debido a que el autor realiza las mediciones de las larvas los días en que agrega el alimento, como en el presente experimento se agregó la totalidad del alimento al inicio de los ensayos se decidió realizar las mediciones los mismos días en que tomaban las muestras para medir las variables de control. Para esto, se tomó una muestra aleatoria de 15 larvas por recipiente, las cuales se midieron empleando un calibrado pie de rey (Figura 36) y a su vez se pesaron por medio de una balanza analítica (Figura 37).

Figura 36.

Medición de larvas.



Nota. En la figura se puede observar como fue el proceso de medición de las larvas y el instrumento usado para esto.

Figura 37.

Pesaje de las larvas.















Nota. En la figura se puede apreciar el proceso de pesaje de cada larva y el equipo usado.

Adicional a las mediciones anteriores, se llevó a cabo un registro fotográfico de 3 larvas que aparentemente su tamaño era diferente con el objetivo de observar su crecimiento a lo largo del tiempo, esto se puede evidenciar en la Figura 38.

Figura 38.

Seguimiento fotográfico de las larvas durante el proceso de biodegradación de residuos.

| DÍA 4 (27/05/2022) | | | |
|---|---|--|---|
| FRESCOS | COCIDOS | CÁRNICOS | MEZCLAS |
|  |  |  |  |
| DÍA 8 (31/05/2022) | | | |
| FRESCOS | COCIDOS | CÁRNICOS | MEZCLAS |
|  |  |  |  |
| DÍA 9 (01/06/2022) | | | |
| FRESCOS | COCIDOS | CÁRNICOS | MEZCLAS |
|  |  |  |  |

DÍA 11 (03/06/2022)

FRESCOS

COCIDOS

CÁRNICOS

MEZCLAS



DÍA 14 (06/06/2022)

FRESCOS

COCIDOS

CÁRNICOS

MEZCLAS



DÍA 16 (08/06/2022)

FRESCOS

COCIDOS

CÁRNICOS





MEZCLAS



DÍA 18 (10/06/2022)

| FRESCOS | COCIDOS | CÁRNICOS | MEZCLAS |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |

DÍA 21 (13/06/2022)

| FRESCOS | COCIDOS | CÁRNICOS | MEZCLAS |
|--|--|---|--|
|  |  |  |  |

DÍA 23 (15/06/2022)

| FRESCOS | COCIDOS | CÁRNICOS | MEZCLAS |
|---|---|------------------------|------------------------|
|  |  | EXPERIMENTO FINALIZADO | EXPERIMENTO FINALIZADO |

Nota. En la figura se puede observar el crecimiento de las larvas de cada ensayo durante los 21 días que duró el experimento para mezclas y residuos cárnicos y 23 días para residuos frescos y cocidos.

Es importante resaltar que en caso contrario al objetivo del proyecto en cuanto a la edad de las larvas, es decir, que el objetivo fuera llegar hasta la etapa adulta de la mosca, se necesitaría de un ambiente oscuro que brinde una protección en cuanto a las condiciones ambientales externas como lo es la temperatura, la humedad, el movimiento del aire y demás; en este ambiente oscuro ingresan en etapa de pupa y aproximadamente entre 2 y 3 semanas después se convierten en MSN [62].

Para la medición de las variables de control del sustrato se usó la metodología descrita en el *Anexo 2- Protocolo para los análisis de parámetros físicos de los biorresiduos*. Al igual que con las larvas, se llevó a cabo un registro fotográfico para los sustratos, con el objetivo de observar el cambio en su aspecto con el paso del tiempo, esto se puede observar en la Figura 39, en donde se compara el sustrato al inicio y al final del experimento.

Figura 39.

Comparación de sustratos.

| EXPERIMENTO | SUSTRATO INICIAL | SUSTRATO FINAL |
|-------------|---|---|
| FRESCOS |  |  |

COCIDOS



CÁRNICOS



MEZCLAS



Nota. En la figura se observa la comparación de los sustratos entre el día inicial de proceso de degradación y el último día del experimento.

Posterior a la finalización del experimento, se procedió al sacrificio de las larvas, el método por el cual se llevó a cabo es el de escaldado; este procedimiento se seleccionó por su viabilidad y factibilidad en cuanto a su desarrollo y los buenos resultados que se obtienen en cuanto a la calidad de la proteína. Leni [70] señala que la desvitalización por escaldado inhibe el pardeamiento de la harina, aumenta la capacidad de extracción de proteínas, evita la pérdida de aminoácidos esenciales y mejora la digestibilidad enzimática.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se siguieron los pasos presentados a continuación para la obtención de la harina de proteína.

1. Separar las larvas del sustrato empleando un sistema de tamices.
2. Calentar agua a 100°C en un recipiente.
3. Sumergir las larvas en agua caliente por 40 segundos con ayuda de un colador.
4. Retirar las larvas del agua caliente.
5. Retirar el exceso de agua en las larvas con ayuda de papel absorbente.

6. Retirar la humedad de las larvas en la mufla a 50°C por 1 hora hasta obtener peso constante.
 7. Triturar las larvas por medio de un molino corona para obtener la harina de proteína de MSN.
- La secuencia de los pasos se puede observar en la Figura 40.

Figura 40.

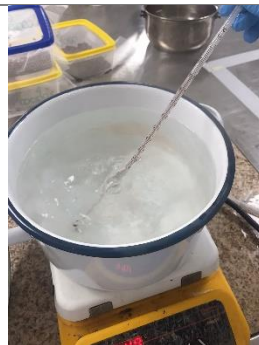
Pasos para la obtención de la harina de proteína de Mosca Soldado Negro.

OBTENCIÓN DE HARINA DE PROTEÍNA DE MSN

SEPARACIÓN



**PREPARACIÓN DEL
AGUA**



ESCALDADO



**REMOCIÓN EXCESO DE
AGUA**



SECADO



TRITURACIÓN

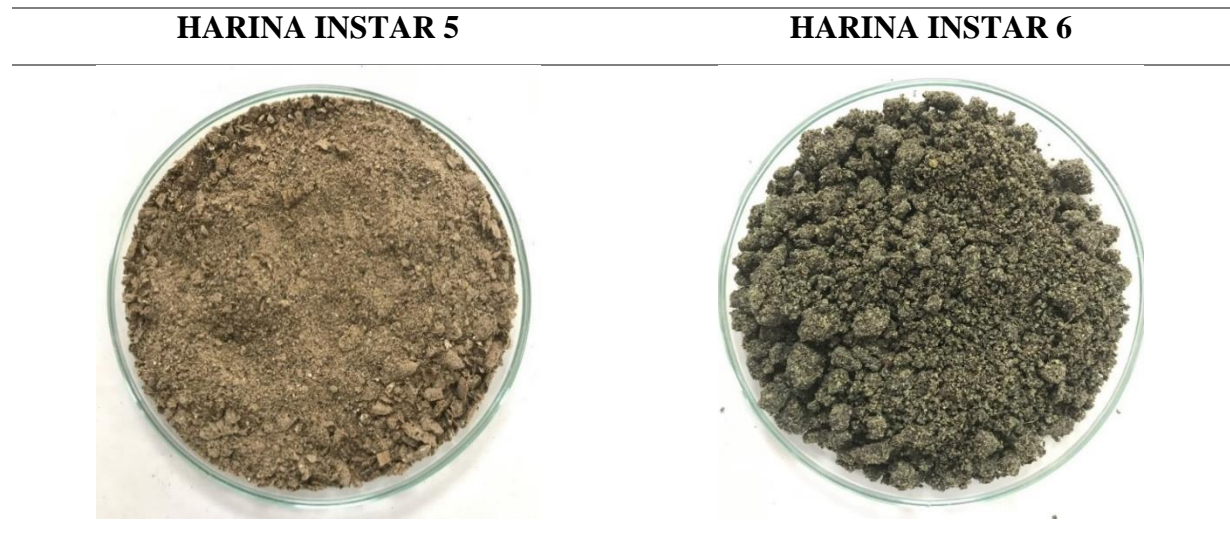


Nota. En la figura se muestra la secuencia de los pasos para obtener la harina de proteína desde la separación de las larvas del sustrato hasta su posterior trituration.

La obtención de harina de proteína de MSN se realizó en dos de los cuatro experimentos realizados, en el experimento de residuos frescos y en las mezclas con la finalidad de cumplir el último objetivo general del documento. Las larvas encontradas en los recipientes de residuos frescos se encontraban en el instar 5 y a su vez las larvas de los recipientes de las mezclas se encontraban en el instar 6 (prepupal), la materia obtenida después de la trituration de cada uno de los instares de evidencia en la Figura 41.

Figura 41.

Harina de proteína de larva de Mosca Soldado Negro.



Nota. Se aprecia los dos tipos de harina obtenidos según el instar de la larva que se trituró.

4.2 Resultados y análisis

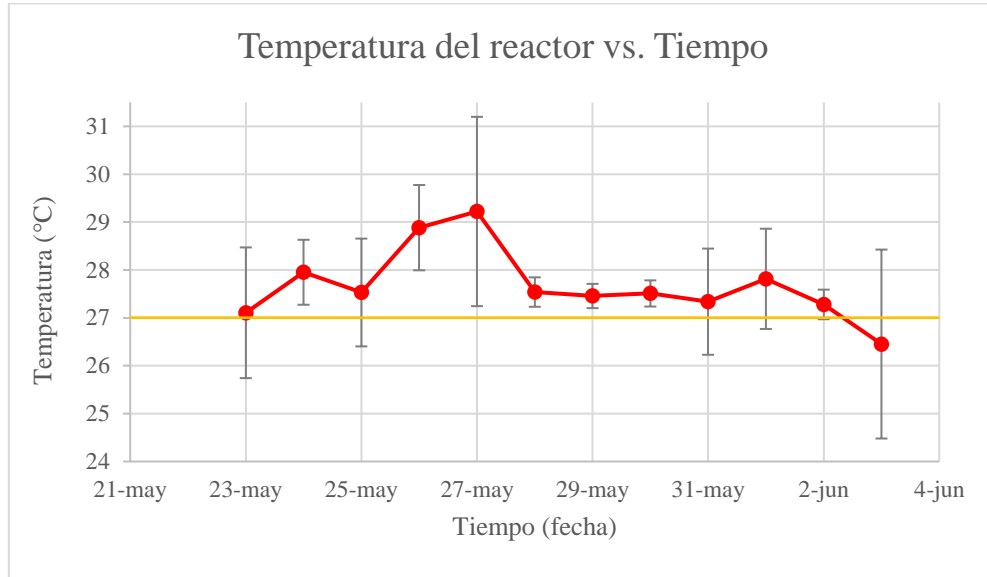
4.2.1 Estabilidad de las condiciones de operación del reactor y su influencia en el desarrollo larval.

Como se mencionó en el capítulo 2, los datos arrojados por los sensores del biorreactor fueron extraídos de la plataforma virtual *phpMyAdmin* con el fin de analizar los cambios de temperatura y humedad. Los intervalos de tiempo tomados por los sensores del reactor son de 10 minutos en un periodo estipulado de tiempo, la fecha de inicio de esta toma de datos fue el día 23 de mayo de 2022 y su finalización corresponde al 3 de junio de 2022, es importante mencionar que no se obtuvieron valores hasta la finalización del experimento por fallas en el programa. A partir de estos datos se obtuvo un promedio diario para la construcción de la figura 42 y la figura 43.

A lo largo del documento se ha mencionado que las variables de temperatura y humedad son de suma importancia en el desarrollo de las larvas, por tal motivo se establecieron valores específicos de dichas variables en el biorreactor considerando posibles variaciones dentro del sistema, estas variaciones se pueden atribuir principalmente a manipulaciones del equipo.

Figura 42.

Variación de la temperatura en el interior del reactor.

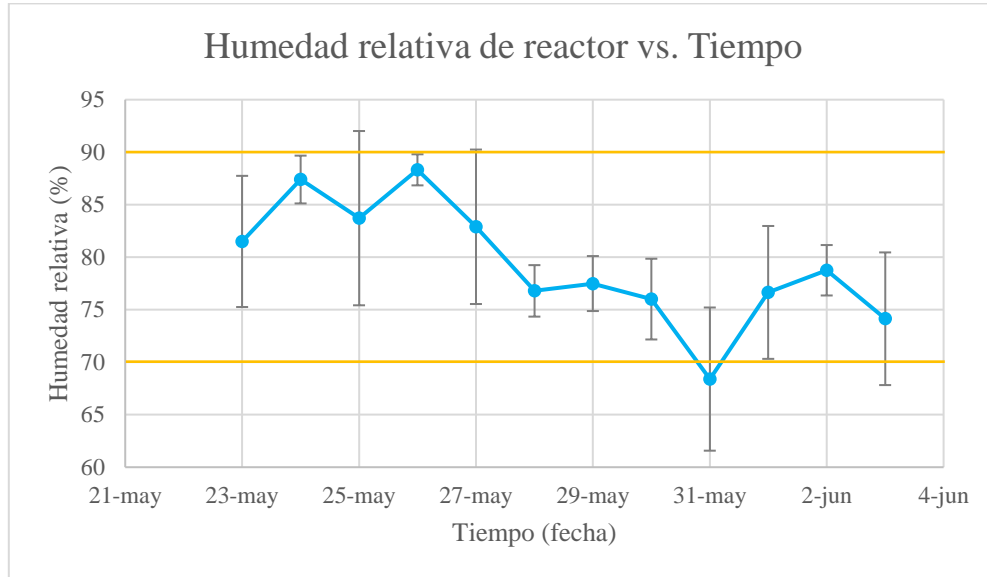


Nota. Esta figura hace referencia a la temperatura del biorreactor arrojada por la plataforma virtual *phpMyAdmin*. Las líneas negras hacen referencia a la desviación estándar de cada uno de los valores y la línea amarilla corresponde a la temperatura definida inicialmente.

Realizando un análisis de la figura 42 que corresponde a la variación de la temperatura en el biorreactor a lo largo del tiempo, se observa que la temperatura como se mencionó anteriormente no fue constante, el valor máximo arrojado por el sensor de temperatura se atribuye al día 27 de mayo de 2022 el cuál es 28,71°C, a su vez el valor mínimo en el biorreactor registrado el día 3 de junio de 2022 fue de 25,95°C. Adicional a la gráfica se calculó la temperatura promedio del biorreactor con un valor de 27,17°C \pm 0,75 el cual es relativamente cercano al valor de temperatura estipulado en el equipo que corresponde la línea amarilla en la gráfica. Finalmente se observa que los valores más altos de desviación estándar corresponden a los días donde se manipuló el reactor para la medición de larvas y variables en los sustratos.

Figura 43.

Variación de la humedad relativa en el biorreactor



Nota. Esta figura hace referencia a la humedad relativa en el biorreactor arrojada por la plataforma virtual *phpMyAdmin*. Las líneas negras hacen referencia a la desviación estándar de cada uno de los valores y las líneas amarillas corresponden al umbral de humedad definido.

La figura 43 refleja la variación de la humedad relativa durante el tiempo en el biorreactor, en esta se observa un valor máximo de humedad el día 26 de mayo de 2022 siendo 88,32% y un valor mínimo de humedad registrado el día 31 de mayo de 2022 con un valor de 68,39% el cual no se encuentra dentro del rango establecido (líneas amarillas). El valor promedio de humedad relativa es de $79,39\% \pm 5,70$ el cual corresponde al rango que se estipuló desde un inicio en el biorreactor que se ubica en un rango de 70 a 90%. Los valores de desviación estándar más altos se encuentran en los días donde hubo manipulación del equipo.

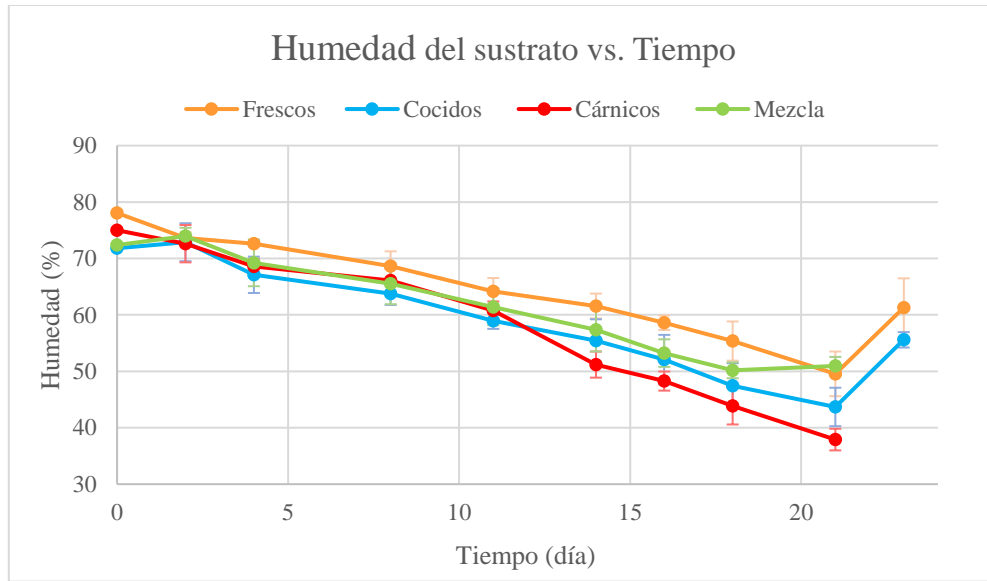
4.2.2 Comportamiento de las variables del sustrato durante el periodo de biodegradación larvaria

Las variables establecidas para realizar el seguimiento del sustrato durante el proceso fueron la humedad relativa, el porcentaje de cenizas y el pH. El protocolo de esto se encuentra en *Anexo 2- Protocolo para los análisis de parámetros físicos de los biorresiduos*. Cabe aclarar que los 4 experimentos tuvieron fechas de finalización distintas, la finalización de los

experimentos de cárnicos y mezclas tuvo lugar en el día 21 (13 de junio 2022) y los dos restantes en el día 23 (15 de junio 2022), esto se debe a que en los experimentos de mezclas y cocidos las larvas se encontraban ya en el instar 6 y se decidió extender dos días más los experimentos de residuos frescos y cárnicos debido a que no se encontraban aún todas las larvas en el instar requerido. A continuación, se encuentran una serie de gráficas donde se registraron los resultados obtenidos de cada una de las mediciones.

Figura 44

Variación del contenido de humedad en cada sustrato durante el proceso de biodegradación larvaria.



Nota. En esta figura se observa la humedad de cada uno de los sustratos empleados en el experimento. Los residuos frescos corresponden a la línea naranja, los cocidos a la línea azul, los cárnicos a la línea roja y finalmente las mezclas a la línea verde. Cada uno de los valores cuenta con su desviación estándar.

Siguiendo el cronograma ubicado en la Figura 35, en la figura 44 se registraron los datos de la humedad que se tomaron en cada uno de los cuatro sustratos empleados en el proceso. El inicio de cada uno de los 4 experimentos se dio el día 23 de mayo de 2022, inicialmente se tuvo un rango de humedad del 80 al 90% y a través del tiempo se observa en la gráfica que la humedad en cada uno de los sustratos tiende a disminuir debido a que el biorreactor tiende a funcionar como un equipo de secado, Cheng [41] indica que la reducción de humedad en el alimento

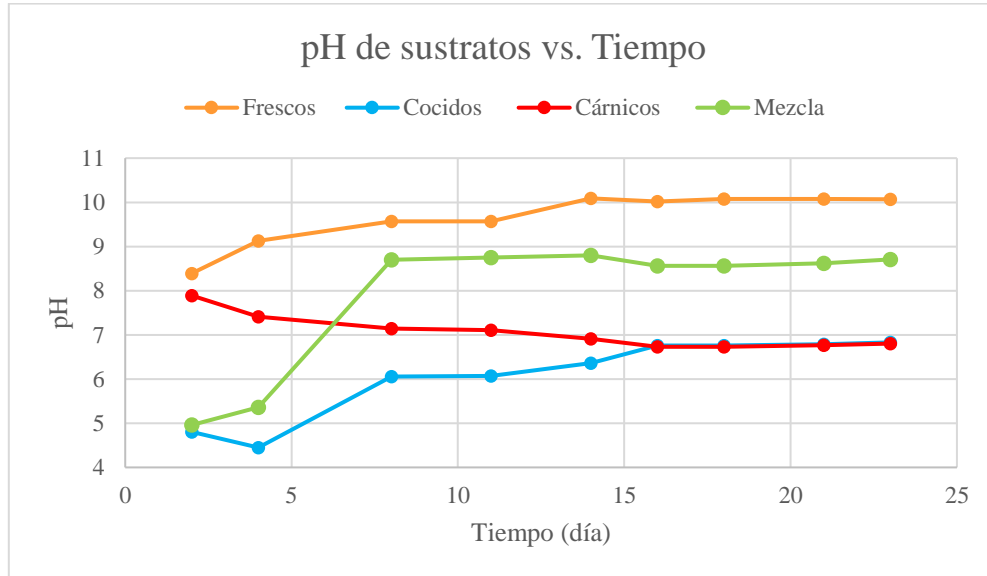
ralentiza el crecimiento larval, por tal motivo es de suma importancia identificar si algún valor reportado es inferior al 50% para así realizar correcciones y no afectar el proceso. Cabe aclarar que esta disminución en la humedad del sustrato no es un aspecto negativo desde que se controlen los umbrales ya que en la etapa final del proceso se busca que estos valores sean cercanos al 50% para así facilitar la separación del sustrato y las larvas.

En la figura 44 se identifica que el porcentaje de humedad en los residuos cárnicos (color rojo) estuvo por debajo del 50% desde el día 16 con un valor promedio de 48,27%, debido a esto se debió hacer un ajuste agregando agua a los recipientes para aumentar su humedad, sin embargo al adicionar el agua se evidenció que no fue posible combinarla con el sustrato, esto se debe al alto contenido de grasa presente en estos residuos (valor consignado en la tabla 5); por ende no fue posible solucionar el problema del bajo contenido de humedad a partir de este día.

En el caso de los residuos frescos el valor obtenido de humedad en el día 21 se encontró al límite del rango estipulado, con un valor de 50,94%, por tal motivo se tomó la decisión de ajustar dicho valor buscando sobrepasar el 50%, para esto se agregó un promedio de agua de 18,56 g por recipiente; gracias a esto se logró modificar el porcentaje y obtener así en el día 23 un 61,27%. Por otra parte, se evidencia que en los residuos cocidos hubo también una disminución de humedad por debajo del 50% el día 21, el promedio de humedad arrojado en este día fue de 43,68%; igualmente que con los residuos frescos se buscó aumentar la humedad agregando un promedio de agua de 38,52 g, finalmente en la siguiente medición programada en el cronograma (día 23) se obtuvo un porcentaje de humedad del 55,58%.

Figura 45

Variación del pH en cada sustrato durante el proceso de biodegradación larvaria



Nota. En esta figura se observan los valores de pH de cada uno de los sustratos empleados en el experimento. Los residuos frescos corresponden a la línea naranja, los cocidos a la línea azul, los cárnicos a la línea roja y finalmente las mezclas a la línea verde.

La figura 45 describe las mediciones de pH realizadas en cada uno de los experimentos de acuerdo al cronograma estipulado. Se observa que los valores registrados de los residuos frescos, cocidos y mezclas tienden a subir con el paso del tiempo, sin embargo, el pH de los residuos cárnicos tiene a disminuir. Ma [42] identifica que el pH inicial del sustrato es un factor fundamental en el crecimiento larval, el peso final de las larvas resulta ser mayor en sustratos con un pH inicial de 6 y de 10, sin encontrar diferencias significativas y por otro lado el menor peso obtenido de las larvas proviene de sustratos con valores iniciales de pH de 2 y de 4.

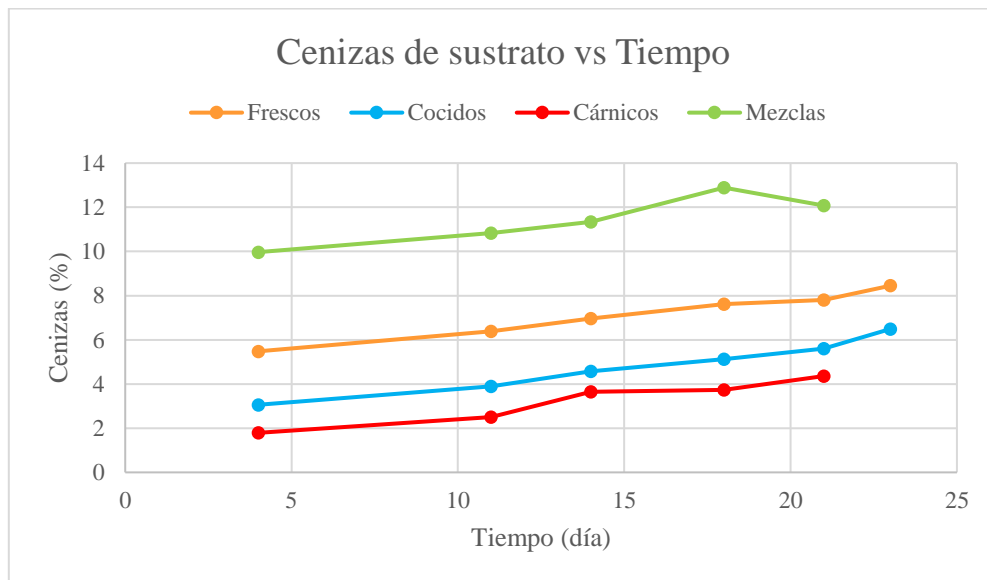
El valor inicial de pH es de suma importancia ya que si este se encuentra en un rango inferior al 1,8 se pondría el riesgo el desarrollo larval [42], en este caso ningún sustrato pertenecía a este rango por lo que no fue necesario realizar ningún ajuste. A partir de la bibliografía se esperaba que las larvas del experimento de los residuos cárnicos y los residuos frescos obtuvieran un mayor peso, sin embargo, experimentalmente no se obtuvo este resultado por factores externos diferentes al pH; los valores de tallas se pueden observar en la tabla 28 donde se

identifica que las larvas con mayor peso se encuentran en los experimentos de residuos cocidos y mezclas.

Finalmente se identifica en la figura 46 que el pH de tres de los cuatro sustratos tienden a alcalinizarse, basándose en el estudio de Ma [42] esto se debe a la liberación de iones de amonio y amoniaco, sin embargo en el experimento de residuos cárnicos no se apreció el mismo efecto debido al impacto del enranciamiento de la grasa el cual consiste en que los alimentos con un alto contenido de grasas tienden a tomar un mal sabor y olor generados durante el deterioro oxidativo [71].

Figura 46

Variación del contenido de cenizas en cada sustrato durante el proceso de biodegradación larvaria



Nota. En esta figura se observan los valores del contenido de cenizas de cada uno de los sustratos empleados en el experimento. Los residuos frescos corresponden a la línea naranja, los cocidos a la línea azul, los cárnicos a la línea roja y finalmente las mezclas a la línea verde.

Finalizando la medición de variables de los sustratos se presenta la figura 46 la cual describe el contenido de cenizas en cada uno de los sustratos del proceso, estas mediciones se efectuaron siguiendo el cronograma estipulado en la Figura 35. En esta figura se aprecia que en

todos los sustratos hubo un aumento en las cenizas, como también se identifica que la variación de cada medición fue mínima.

Por medio de los datos de la Tabla 8 se puede observar que los valores obtenidos inicialmente en cada una de las variables que afectan directamente a los sustratos establecidos.

Tabla 8.

Variables iniciales de los sustratos

| Sustrato | Humedad (%) | pH | Cenizas (%) |
|--------------------------|--------------------|-----------|--------------------|
| Residuos frescos | 78,06 ± 0,49 | 8,39 | 5,48 |
| Residuos cocidos | 71,84 ± 0,28 | 4,80 | 3,06 |
| Residuos cárnicos | 75 | 7,89 | 1,79 |
| Mezclas | 72,38 | 4,96 | 9,97 |

Nota. Esta tabla muestra los valores iniciales de las variables medidas en los sustratos, en este caso la humedad, el pH y el contenido de cenizas. El valor de humedad de los residuos cárnicos no cuenta con desviación estándar debido a que este valor se ajustó para llegar a dicho porcentaje, igualmente el valor de humedad de las mezclas también carece de la desviación estándar ya que proviene de un cálculo que asocia la humedad de cada uno de los componentes de esta mezcla.

4.2.3 Influencia de la dieta en la talla de las larvas

El alimento usado para el desarrollo larval es uno de los factores que más relevancia tiene en cuanto a los resultados del proceso. Los macronutrientes (lípidos, proteínas, carbohidratos) al ser los que suministran la mayor parte de energía metabólica inciden de manera directa en el crecimiento, tiempo de desarrollo y peso de las larvas al finalizar el proceso de degradación de residuos. Además de esto, el tipo de biorresiduos empleado como sustrato puede llegar a determinar el rendimiento y eficiencia del proceso. Actualmente uno de los mayores desafíos del procesamiento de biorresiduos con BSF es determinar la combinación de residuos que ofrezca el mejor resultado a lo largo del proceso [36], es por esto que aún se emplea gran variedad de sustratos con la finalidad de observar el comportamiento de las larvas a partir de este y la eficiencia del proceso.

Los biorresiduos están compuestos en mayor proporción por carbohidratos, macronutriente que influye directamente en el contenido de lípidos de las larvas; una dieta con mayor proporción de carbohidratos que proteínas en comparación con una dieta equilibrada en estos macronutrientes suele tener como resultado larvas con mayor porcentaje de lípidos [36]. Por otro lado, las proteínas son el macronutriente que influye de manera más significativa dentro del rendimiento del proceso con larvas de mosca soldado negro, dietas con alto contenido de proteína se traduce en larvas con mayor peso larval, mayor tasa de bioconversión y contenido de proteína, además de menor tiempo de desarrollo y menor contenido de lípidos [36]. En cuanto al contenido de fibra, la MSN no posee enzimas que permitan la degradación de este tipo de nutrientes, sin embargo, grandes cantidades de esta puede significar la reducción del rendimiento en el proceso [36].

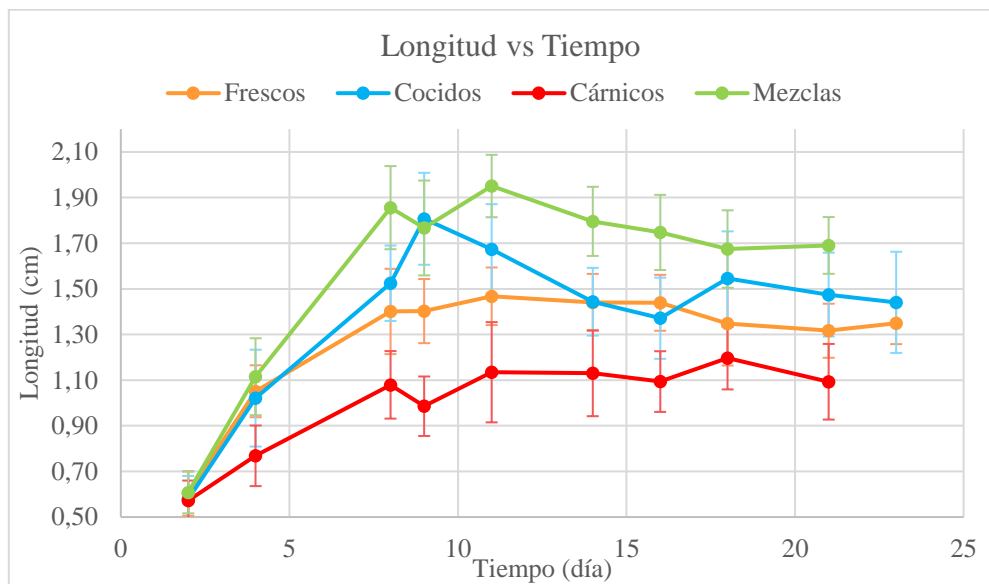
En cuanto al contenido de lípidos, según estudios se ha identificado que influyen directamente en la composición de ácidos grasos de las larvas, sin embargo, se considera que un exceso de lípidos en el sustrato puede disminuir el desarrollo de estas [36].

Por medio de las tablas presentadas al inicio del presente capítulo, se puede asumir que la dieta de residuos frescos al estar mayormente compuesta por residuos de vegetales y frutas tiene un composición aproximada de carbohidratos de 8,64% y proteína de 11,54%, lo cual permite que pueda llegar a ser equilibrada en cuanto a estos; por otro lado, la dieta de residuos cocidos (residuos de restaurantes), posee aproximadamente 6,18% de carbohidratos y 19,01% de proteína, esto evidencia una mayor cantidad de proteína dentro de la dieta lo cual puede llegar a incidir directamente en la bioconversión y eficiencia del proceso. En cuanto a los residuos cárnicos no se encontró registro de dietas para MSN basadas en este tipo de alimento, sin embargo, por medio de los análisis experimentales realizados previamente a los sustratos, se puede asumir que hay un exceso de lípidos dentro del alimento, debido a que el porcentaje de grasa extraído fue de $80,55\% \pm 1,32$ en base seca, lo cual significa que hay un nivel considerable de lípidos en la composición de alimento que puede llegar a limitar el crecimiento de las larvas que se desarrollan en este tipo de sustrato.

Como se mencionó en la metodología presentada al inicio del capítulo, se realizaron mediciones con la finalidad de observar el crecimiento de las larvas de MSN a lo largo del proceso de degradación, los valores tomados durante el periodo que duró el proceso (23 días) se compararon entre las larvas alimentadas con los diferentes sustratos empleados tanto para longitud (Figura 47) y ancho (Figura 48) como para el peso (Figura 49) con el objetivo de establecer si estos tuvieron incidencia dentro de la talla de las larvas.

Figura 47.

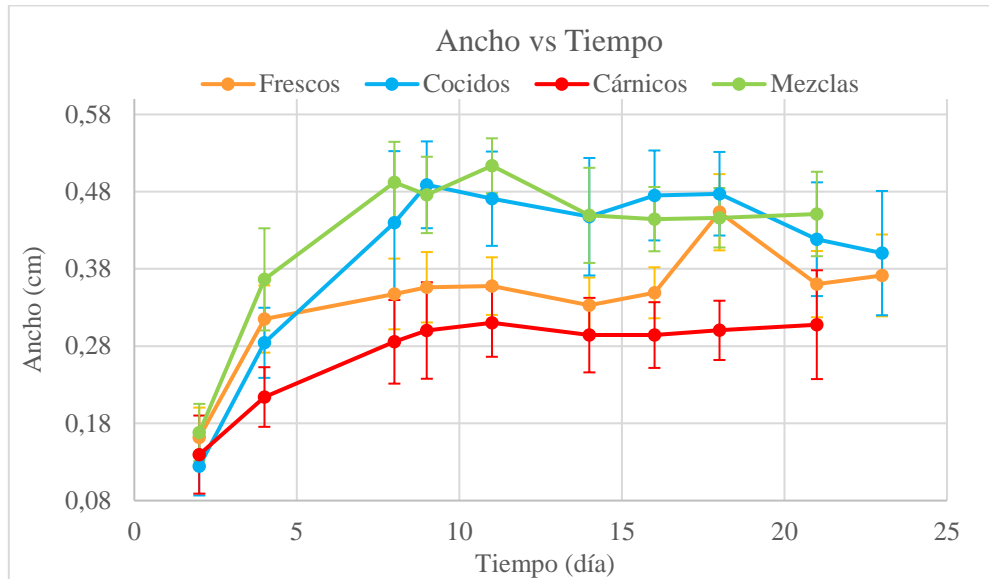
Variación de la longitud de las larvas durante el proceso de biodegradación.



Nota. En la figura se puede observar el crecimiento de las larvas en relación a la longitud con su respectiva desviación estándar.

Figura 48.

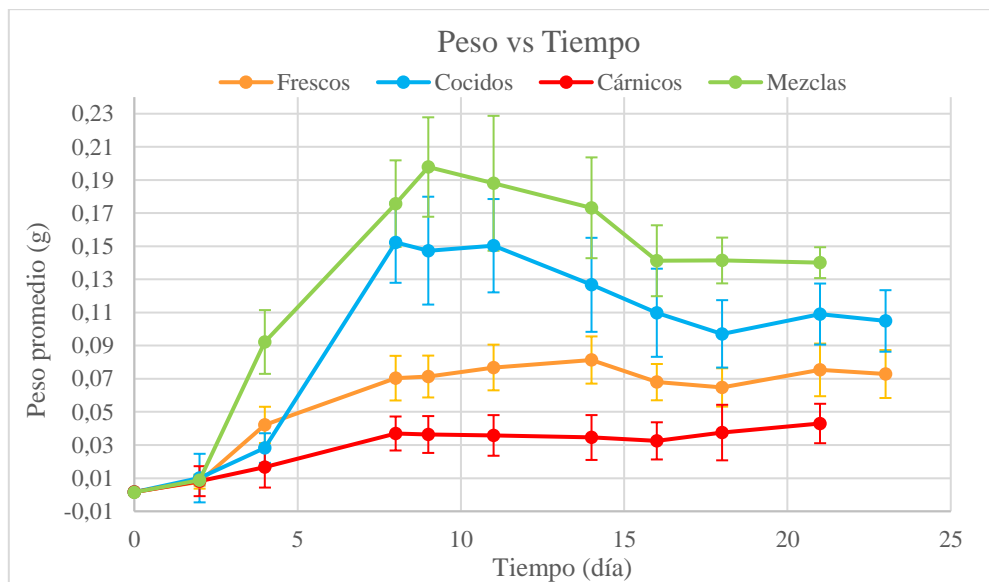
Variación del ancho de las larvas durante el proceso de biodegradación.



Nota. En la figura se puede observar el crecimiento de las larvas en relación al ancho con su respectiva desviación estándar.

Figura 49.

Variación del peso de las larvas durante el proceso de biodegradación.



Nota. En la figura se puede observar el crecimiento de las larvas en relación al peso con su respectiva desviación estándar.

Por medio de las gráficas presentadas se puede observar que hay un crecimiento sigmoideal en las tres variables medidas (ancho, largo y peso) como lo explica Abduh [72] en su investigación “*Effects of aeration rate and feed on growth, productivity and nutrient composition of black soldier fly (Hermetia illucens L.) larvae*”, esto significa que en primera instancia hay un crecimiento acelerado que posteriormente desacelera o decrece debido a la escasez de los nutrientes; otra razón de este comportamiento puede atribuirse a que las larvas alcanzan el máximo umbral de crecimiento, sin embargo, tallas reportadas por Pérez – Pacheco [65] (Figura 50) demuestran que todavía existe un alto potencial de crecimiento que no fue explotado en su totalidad en cuanto a las larvas desarrolladas en el presente proyecto; esto pudo ser causado por diversos motivos como la composición de la dieta, el tiempo de desarrollo larval, la humedad del sustrato, la densidad larval y demás factores que pueden incidir de manera directa en el proceso de biodegradación.

Figura 50.

Valores de tallas larvales reportados por Pérez – Pacheco.

| Artículo | Sustrato | Longitud (cm) | Peso (g) | Referencia |
|---|-------------------------|---------------|--------------|------------|
| Growth of the Black Soldier Fly Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae) on Organic-Waste Residues and Its Application as Supplementary Diet for Nile Tilapia Oreochromis niloticus (Perciformes: Cichlidae) | Residuos de restaurante | 2,359 ± 1,84 | 0,250 ± 0,04 | [65] |
| | Residuos de pescado | 1,989 ± 2,58 | 0,210 ± 0,05 | |

Nota. En la figura se puede observar las tallas para peso y longitud de larvas alimentadas con residuos de alimentos reportadas por Pérez – Pacheco.

Para las tres variables medidas se puede establecer como día clave para el crecimiento el día 4, en donde empezó el crecimiento de forma exponencial para los 4 sustratos, sin embargo, no todas las dietas tuvieron el mismo éxito en cuanto a las tallas finales de las larvas; en la Tabla 9 se pueden observar las tallas máximas y finales de las larvas según la dieta en que se

desarrollaron, cabe aclarar que las tallas máximas se consideraron en diferentes días para cada experimentos ya que ningún ensayo coincidió en cuanto al máximo crecimiento de las larvas.

Tabla 9.

Tallas máximas y finales de las larvas en los 4 experimentos.

| Variable | Sustrato | | | |
|----------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------|
| | Residuos frescos | Residuos cocidos | Residuos cárnicos | Mezclas |
| Longitud máx. (cm) | 1,47 ± 0,126 | 1,81 ± 0,202 | 1,20 ± 0,137 | 1,95 ± 0,137 |
| Longitud final (cm) | 1,32 ± 0,118 | 1,47 ± 0,184 | 1,09 ± 0,166 | 1,69 ± 0,124 |
| Ancho máx. (cm) | 0,45 ± 0,049 | 0,49 ± 0,056 | 0,31 ± 0,044 | 0,51 ± 0,035 |
| Ancho final (cm) | 0,37 ± 0,053 | 0,40 ± 0,080 | 0,31 ± 0,070 | 0,45 ± 0,055 |
| Peso máx. (cm) | 0,08 ± 0,014 | 0,15 ± 0,024 | 0,04 ± 0,012 | 0,19 ± 0,030 |
| Peso final (cm) | 0,07 ± 0,016 | 0,11 ± 0,018 | 0,04 ± 0,012 | 0,14 ± 0,009 |

Nota. La tabla muestra las tallas máximas y finales de cada experimento. Las tallas máximas se dieron en diferentes días tanto para cada experimento como para cada variable.

Como se puede observar en las 3 graficas presentadas previamente el sustrato tiene una incidencia directa en cuanto al tamaño de las larvas de mosca soldado negro, es por esto que se puede determinar que los mejores resultados en cuanto a la talla de las larvas fue la dieta de mezclas (residuos frescos, residuos cocidos y residuos de poda). De acuerdo a la revisión bibliográfica relacionada con la composición nutricional de los sustratos se puede establecer que la dieta de mezclas al tener dos biorresiduos con mayor porcentaje de proteína que carbohidratos tendrá mejores resultados en cuanto al peso larval, esto se puede comprobar mediante los datos de la tabla 9 en donde se evidencia que posee tanto las mejores tallas máximas como las mejores tallas finales en comparación con las larvas alimentadas con los demás sustratos.

Así mismo, se observó que las tallas de larvas más deficientes fueron las alimentadas con residuos cárnicos, esto puede ser el resultado del alto porcentaje de grasa dentro del sustrato ya que sobrepasa el 50% de la composición total en base seca del alimento. Las larvas alimentadas con residuos cocidos fueron el segundo experimento con mejores resultados en cuanto a la talla

de las larvas, lo cual puede atribuirse al alto contenido de proteína (19,01%) en la composición de la dieta con respecto a los demás sustratos usados.

Si se realiza una comparación con larvas desarrolladas en sustratos similares en cuanto al peso de estas, se puede observar que para ensayos realizados por Nyakeri [73] con sustratos a base de residuos de alimentos, se obtuvieron larvas con un peso promedio de $0,101 \text{ g} \pm 0,002$; lo cual indica que se lograron mejores resultados por medio del sustrato empleado en el presente proyecto.

Por otro lado, las larvas alimentadas con residuos frescos (vegetales y frutas) tuvieron un valor de talla inferior si se compara con experimentos similares en cuanto al sustrato; Jucker [74] reporta larvas con peso de $0,154 \text{ g} \pm 0,003$ alimentadas con una mezcla de frutas y verduras, y a su vez, Bonelli [64] reporta larvas con peso de $0,188 \text{ g} \pm 0,008$ alimentadas con una mezcla de vegetales.

Como se mencionó anteriormente, las larvas de los 4 sustratos en los últimos días del experimento tuvieron un decrecimiento en cuanto a sus tallas, en esto pudo incidir la pérdida de humedad que hubo a través del tiempo que duró el experimento, así como la poca disponibilidad de nutrientes ya que la mayoría de estos fueron consumidos por las larvas en los días previos. De igual manera, el proceso de muda es un aspecto determinante en la pérdida de peso de las larvas; estas cuando se encuentran en el instar 6 (prepupa) pasan por un proceso de muda de piel (Figura 51), en donde el exoesqueleto se oscurece y se forma una pupa adentro de este, posterior a unos días esta capa de la piel es desprendida de forma natural ocasionando una disminución en el peso [75]. En promedio las larvas alimentadas con residuos frescos, cocidos y mezclas disminuyeron su peso en un 12,5%, 26,6% y 26,31% respectivamente, mientras que las larvas alimentadas con residuos cárnicos no tuvieron un porcentaje de disminución con respecto al peso final ya que su peso máximo se dio en el último día del ensayo.

Figura 51.

Muda de piel de la larva de MSN.



Nota. En la figura se observa el proceso de muda de la larva de mosca soldado negro que como parte del ciclo de vida de la larva.

Como se mencionó al inicio del presente capítulo, se realizó un análisis de la varianza con un factor (ANOVA) con la finalidad de determinar si existe una diferencia significativa en cuanto a la variable del peso según el sustrato suministrado a las larvas; se eligió esta variable por su relevancia en cuanto a la obtención de biomasa larval al finalizar el proceso de degradación. Para el análisis de varianza se empleó la herramienta STATGRAPHICS Centurion VERSION XVI.II ® en donde se ingresaron los valores del peso de las larvas según el día en donde se obtuvo el mayor dato para cada experimento; para el sustrato de residuos frescos se usaron los valores del día 14, para los residuos cocidos se usaron los valores del día 8, para los residuos cárnicos se emplearon los datos del día 21 y para la dieta de mezclas se seleccionaron los datos del día 9 del experimento.

El análisis de la varianza con un factor aplicado a la variable peso según cada sustrato en el mejor día de cada experimento arrojó que existe una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0,05$) entre la media de peso entre un tipo de sustrato y otro con un nivel del 95,0% de confianza como se puede observar en la Figura 52.

Figura 52.

Análisis de la varianza de un factor para los máximos pesos de las larvas.

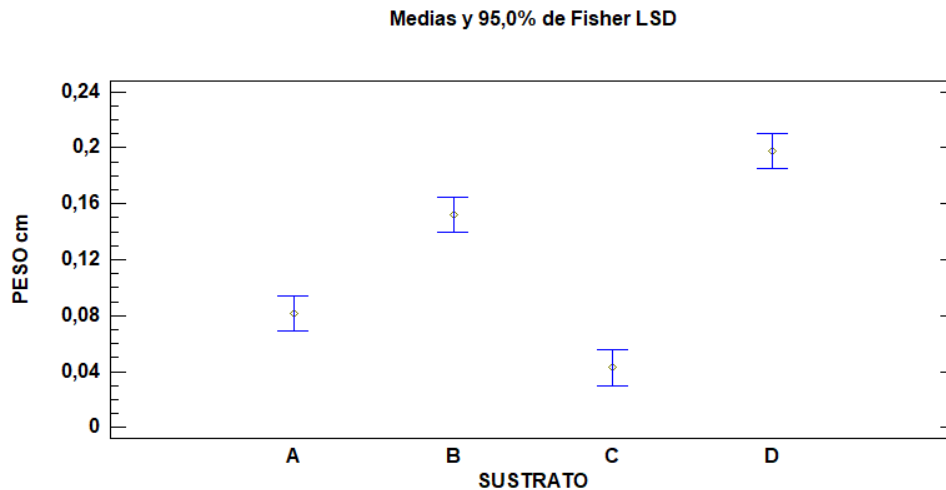
| Tabla ANOVA para PESO cm por SUSTRATO | | | | | |
|--|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
| Entre grupos | 0,64755 | 3 | 0,21585 | 58,76 | 0,0000 |
| Intra grupos | 0,642862 | 175 | 0,0036735 | | |
| Total (Corr.) | 1,29041 | 178 | | | |

Nota. En la figura se puede observar que el valor de $P < 0,05$ para los pesos máximos, confirmando así una diferencia significativa entre los 4 sustratos usados con respecto al peso de las larvas.

Por medio del análisis estadístico también fue posible establecer cuales medias son significativamente diferentes de otras, como se observa en la Figura 53.

Figura 53.

Gráfico de medias para el análisis de varianza de un factor con respecto al máximo peso de las larvas.



Nota. A – Residuos frescos, B – Residuos cocidos, C – Residuos cárnicos y D – Mezclas

A partir de la prueba de múltiples rangos (Figura 54) para la variable peso según el sustrato se puede identificar que existe una diferencia significativa ($P < 0,05$) entre los pesos de las larvas alimentadas con los 4 sustratos usados, comprobando así que el experimento de

mezclas tuvo los mejores resultados como se mencionó anteriormente y las larvas alimentadas con residuos cárnicos los menos favorables.

Figura 54.

Prueba de múltiples rangos para la variable peso (máximo) por cada sustrato.

| <i>Contraste</i> | <i>Sig.</i> | <i>Diferencia</i> | <i>+/- Límites</i> |
|------------------|-------------|-------------------|--------------------|
| A - B | * | -0,0710067 | 0,025218 |
| A - C | * | 0,0383154 | 0,0253609 |
| A - D | * | -0,1165 | 0,025218 |
| B - C | * | 0,109322 | 0,0253609 |
| B - D | * | -0,0454933 | 0,025218 |
| C - D | * | -0,154815 | 0,0253609 |

* indica una diferencia significativa.

Nota. El símbolo de * indica que existe una diferencia significativa entre los sustratos contrastados.

Igualmente, se aplicó un análisis de la varianza con un factor para los datos obtenidos de peso en el último día del experimento (día 21), arrojando de igual manera que existe una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0,05$) entre la media del peso y los tipos de sustratos usados en el experimento con un nivel de confianza del 95,0% como se puede observar en la Figura 55.

Figura 55.

Análisis de la varianza de un factor para los pesos finales de las larvas.

Tabla ANOVA para PESO por SUSTRATO

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre grupos | 0,238827 | 3 | 0,079609 | 531,74 | 0,0000 |
| Intra grupos | 0,0261999 | 175 | 0,000149714 | | |
| Total (Corr.) | 0,265027 | 178 | | | |

Nota. En la figura se puede observar que el valor de $P < 0,05$ para los pesos finales, confirmando así una diferencia significativa entre los 4 sustratos usados con respecto al peso de las larvas.

De igual manera, por medio de la prueba de múltiples rangos se puede determinar que existe una diferencia significativa entre los pesos de las larvas alimentadas con los 4 sustratos

empleados (Figura 56); esto permite validar la hipótesis de que al menos dos de los experimentos implementados poseen diferencias significativas.

Figura 56.

Prueba de múltiples rangos para la variable peso (final) por cada sustrato.

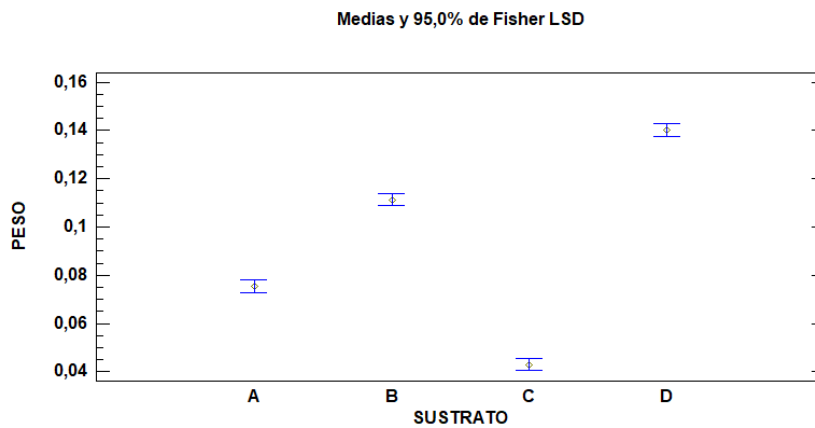
| Contraste | Sig. | Diferencia | +/- Limites |
|-----------|------|------------|-------------|
| A - B | * | -0,0359444 | 0,00509099 |
| A - C | * | 0,0323576 | 0,00511984 |
| A - D | * | -0,0647267 | 0,00509099 |
| B - C | * | 0,0683021 | 0,00511984 |
| B - D | * | -0,0287822 | 0,00509099 |
| C - D | * | -0,0970843 | 0,00511984 |

* indica una diferencia significativa.

Nota. El símbolo de * indica que existe una diferencia significativa entre los sustratos contrastados.

Figura 57.

Gráfico de medias para el análisis de varianza de un factor con respecto al peso final de las larvas.



Nota. A – Residuos frescos, B – Residuos cocidos, C – Residuos cárnicos y D – Mezclas.

4.2.4 Composición nutricional de las larvas de mosca soldado negro

Las larvas de mosca soldado negro poseen la capacidad de convertir residuos orgánicos en biomasa rica en proteína y grasa, sin embargo, esto depende de la calidad del sustrato destinado para su alimentación; a pesar de que en promedio las larvas de BSF tiene un alto contenido de proteína y grasa este tiende a aumentar según la dieta suministrada, además de esto, la composición nutricional de las larvas no depende solamente del alimento, se tienen registros de que la edad es un factor fundamental en cuando al porcentaje de proteína [76].

Por medio de investigaciones, se ha logrado determinar la composición proximal de las larvas de MSN según la alimentación suministrada; a partir de estas se ha encontrado niveles de lípidos de hasta 45% [77] y de proteína de hasta 57,6% en la etapa adulta [78]. Por otro lado, diversos autores han estudiado las fluctuaciones de la composición nutricional de las larvas en cada una de las etapas de vida, desde el huevo hasta el adulto, sin embargo, otros han enfocada sus investigaciones solamente en la última etapa larval (Instar 5) y prepupal (Instar 6).

En el presente proyecto se analizó la composición nutricional de las larvas de mosca soldado negro en el instar 5 (Figura 58) y en el instar 6 (Figura 59), ambas alimentadas con diferentes sustratos; residuos frescos (instar 5) y mezclas (instar 6). Para la identificación de las diferentes etapas larvales durante el experimento, se tuvo en cuenta las principales características correspondientes a la etapa, por ejemplo, las prepupas se caracterizan por su ausencia de movimiento y por un endurecimiento y oscurecimiento de su cutícula hacía una tonalidad de marrón oscuro [79], por el contrario, las larvas en el instar 5 aún poseen movimiento y su color es más claro que el de las prepupas.

Figura 58.

Larvas instar 5.



Nota. En la figura se pueden observar a las larvas de instar 5 previamente separadas de su alimento (residuos frescos).

Figura 59.

Prepupas (Instar 6).



Nota. En la figura se pueden observar a las prepupa (Instar 6) previamente separadas de su alimento (Dieta mezclas).

Para el análisis de la composición de las larvas en cada etapa se realizó el proceso de obtención de harina de proteína mencionado en la metodología; esta fue analizada por el laboratorio AGRILAB S.A.S, el cual arrojó los resultados evidenciados en la *Tabla 10*.

Tabla 10.

Composición de larvas en instar 5 y 6 en base seca y base húmeda.

| Composición (%) | Instar 5 (BS) | Instar 5 (BH) | Instar 6 (BS) | Instar 6 (BH) |
|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Materia seca | 97,4 | 66,9 | 97,4 | 66,9 |
| Proteína cruda | 43,2 | 14,29 | 39,8 | 13,17 |
| Cenizas | 25,2 | 8,34 | 12,3 | 4,07 |
| Grasa | 34,6 | 11,45 | 30,9 | 10,23 |

| | | | | |
|--------------|------|------|------|------|
| Fibra | 12,2 | 4,04 | 10,8 | 3,57 |
|--------------|------|------|------|------|

Nota. La tabla muestra los resultados generados por el laboratorio AGRILAB S.A.S de las larvas sometidas a un análisis bromatológico especial en base seca, a partir de esta se realizó la conversión a base húmeda. BS- Base seca, BH- Base húmeda.

Como se puede observar por medio de la tabla, la suma de los datos generados a partir de los análisis realizados por el laboratorio externo es superior al 100%, por lo cual se considera realizar un proceso de normalización de datos que permita reajustarlos con el objetivo de que la sumatoria de estos sea de 100%, sin embargo, al realizar este proceso se obtiene un porcentaje de proteína para las larvas de instar 5 y 6 de 37,5 y 42,43% en base seca respectivamente, estos valores cambian por completo la percepción de los resultados originales, es por esto que se opta por realizar el análisis de la composición larval a partir de los porcentajes evidenciados en la tabla 10.

Los datos arrojados en el análisis de la harina de proteína evidencian que las larvas alimentadas a partir de residuos frescos (vegetales y frutas) alcanzaron un porcentaje de proteína mayor (43,2%) en comparación con las larvas alimentadas con la dieta de mezclas (39,8%), así mismo, el porcentaje obtenido de grasa de las larvas alimentadas con residuos frescos también fue superior (34,6%) que el de las larvas alimentadas con mezclas (39,8%). Además de tener en cuenta el alimento como factor influyente en la composición nutricional, también se consideró la edad de las larvas como un factor determinante en la calidad de la composición nutricional; Huyben [80] sugiere que las etapas larvaria y prepupal de la MSN pueden llegar a tener diferentes propiedades bioquímicas y nutricionales que influyen directamente en la calidad de proteína a obtener a partir de las larvas y en las tasas de bioconversión del proceso.

Liu [78] reporta que existen fluctuaciones en cuanto a la composición de las larvas según la etapa de vida en la que se encuentre; en larvas neonatales reportó un 56% de proteína, sin embargo, este valor disminuyó en las etapas larvales posteriores al 38% hasta tener un aumento considerable en las larvas maduras del 39,2%, posteriormente el contenido de proteína continuó aumentado hasta un 40,4% en la etapa prepupal y hasta un 46,2% en la etapa de pupa, lo cual indica que desde el instar 5 hasta la etapa de pupa hay un aumento importante en cuanto al contenido de proteína de las larvas; sin embargo, las larvas empleadas en el presente proyecto

no reflejan esta hipótesis debido a que las larvas del instar 5 obtuvieron mayor porcentaje de proteína y grasa que las prepupas (instar 6); por lo cual se podría determinar que el principal factor determinante dentro del contenido nutricional de las larvas fue el alimento.

Experimentos realizados con sustratos similares a los empleados en el proyecto arrojan larvas con valores semejantes a los obtenidos en cuanto a la composición nutricional de las estas, Nyakeri [73] obtuvo larvas con $36,01\% \pm 0,1$ de proteína y $35,9\% \pm 0,1$ de extracto etéreo alimentadas con residuos de alimentos originarios de restaurantes, mientras que Lalander [81] reporta un contenido de proteína cruda de $39,2\% \pm 2,5$ para larvas alimentadas con desechos de alimentos y $41,3\% \pm 1,0$ para larvas alimentadas con desechos de frutas y verduras. Así mismo, Spranghers [66] señala valores de proteína y grasa para larvas alimentadas con residuos de restaurantes de $43,1\% \pm 0,06$ y $38,6\% \pm 2,3$ respectivamente. En comparación con los valores obtenidos para las larvas desarrolladas durante el presente experimento se puede establecer que se obtuvieron valores para proteína y grasa esperados de acuerdo a la literatura.

Así mismo, se encontraron experimentos realizados por Giannetto [77] de larvas alimentadas con residuos vegetales similares a los usados como residuos frescos; la composición nutricional de las larvas se analizó durante el instar 5, lo cual permite realizar una comparación más rigurosa con las larvas criadas en el proyecto a partir de los residuos determinados como frescos ya que estas solamente llegaron hasta el instar 5; dentro del estudio se obtuvo larvas con $36,70\% \pm 2,60$ de proteína cruda y $32,97\% \pm 0,16$ de grasa cruda, valores inferiores a los obtenidos por las larvas alimentadas con los residuos frescos ($43,2\%$ de proteína cruda y $34,6\%$ de grasa cruda).

En cuanto a las prepupas (instar 6) alimentadas con la dieta de mezclas, se encontró un estudio realizado por Abduh [72] en donde se cultivan larvas de MSN alimentadas con residuos de alimentos con la finalidad de analizar su composición nutricional en el instar 6, a partir de esto logran establecer rangos dentro de los cuales está el contenido de proteína y grasa de larvas alimentadas con este tipo de sustrato, el cual es similar a la dieta definida como mezclas.

Tabla 11.

Rangos de composición de prepupa según Abduh.

| Sustrato | Proteína (%) | Lípidos (%) | Carbohidratos (%) | Cenizas (%) |
|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| Residuos de alimento | 35,38 – 46,59 | 9,73 – 38,60 | 22,85 – 35,00 | 2,70 – 19,70 |

Nota. En la tabla se observan los rangos de los macronutrientes que componen a las prepupas.

Por medio de los datos de la Tabla 11 se puede observar que los valores obtenidos tanto para proteína como para grasa de las prepupas alimentadas con la dieta de mezcla hacen parte de los rangos establecidos por el experimento estudiado.

4.2.5 Indicadores de biotransformación del proceso de biodegradación con MSN

Los indicadores de biotransformación son un aspecto fundamental a evaluar dentro del proceso para poder establecer el éxito del experimento; para determinar parámetros como la tasa de supervivencia, la tasa de bioconversión, la eficiencia de conversión a proteína, grasa y fibra entre otros, se emplearon los modelos matemáticos establecidos por diversos autores a partir de sus investigaciones. Algunos parámetros solamente se calcularon para los experimentos de residuos frescos y mezclas debido a la disponibilidad de los datos generados por el laboratorio AGRILAB en cuanto a la composición de las larvas de estos ensayos, sin embargo, parámetros como la tasa de supervivencia y tasa de reducción del residuo se pudieron establecer para todos los experimentos llevados a cabo durante el proceso.

Inicialmente se determinó la tasa de supervivencia de las larvas en los diferentes sustratos empleados, esta tasa indica cuantas larvas lograron sobrevivir al periodo de degradación de residuos a las condiciones de temperatura, humedad relativa y contenido de humedad seleccionadas, además, por medio de la tasa de supervivencia se puede determinar la compatibilidad de las larvas con el sustrato proporcionado. Es importante señalar que las larvas pueden morir por la falta de oxígeno o de humedad, exceso de temperatura, contaminantes dentro del sustrato o una dieta no apta para su desarrollo, entre otros.

Para la determinación de la tasa de supervivencia se empleó la ecuación 2, empleada por Van Der Fels-Klers [82], Gold [83] y Villa [33]. Para el desarrollo de la ecuación se debió realizar un proceso de conteo al final de cada experimento con la finalidad de determinar cuántas larvas sobrevivieron con respecto a la cantidad inicial (500) y así poder establecer la tasa de supervivencia de cada experimento.

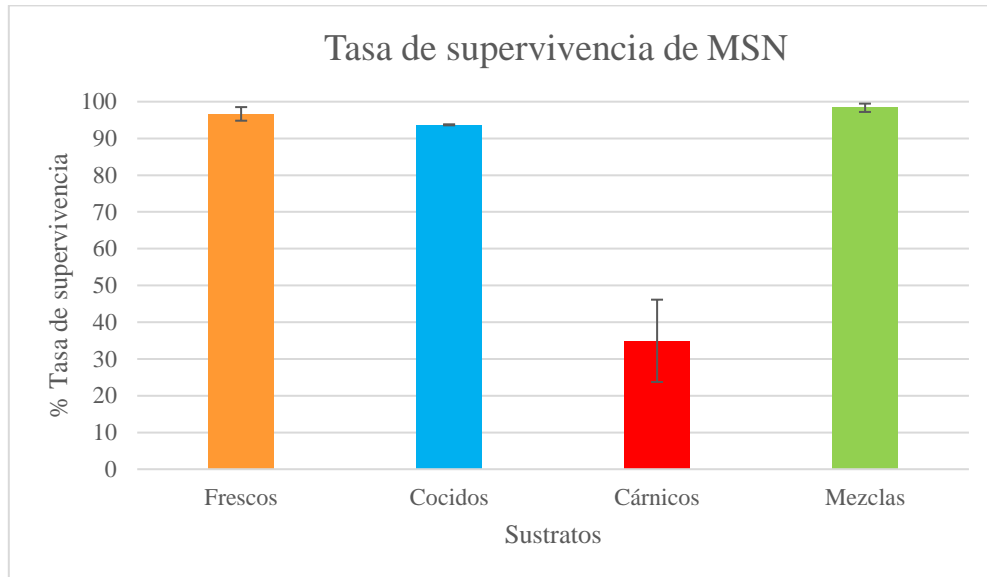
Ecuación 2.

$$Tasa\ de\ supervivencia\ (\%) = \frac{Número\ de\ larvas\ finales}{Número\ de\ larvas\ iniciales} * 100$$

Los resultados se pueden apreciar en la Figura 60, allí se observa que los experimentos de residuos frescos ($96,67\% \pm 1,85$), residuos cocidos ($93,70\% \pm 0,14$) y mezclas ($98,33\% \pm 1,14$) tuvieron tasas de supervivencias superiores al 90 %, valores comparables con los obtenidos por Gold [83] para residuos de alimentos ($92,3\% \pm 3,1$) y para residuos de vegetales ($97,5\% \pm 2,7$). Por el contrario, las larvas alimentadas con residuos cárnicos obtuvieron la tasa de supervivencia más baja ($34,93\% \pm 11,20$), esto se puede atribuir principalmente al sustrato empleado, ya que como se ha mencionado a lo largo del documento, el porcentaje de grasa de los residuos cárnicos consistía en un poco más del 80% del contenido total en base seca del alimento, lo cual afectó de manera directa el desarrollo de las larvas dentro de este, por esto mismo, el contenido de humedad del sustrato descendió de manera rápida a lo largo del tiempo y no fue posible ajustar este valor, lo cual ocasionó que finalizara con un contenido de humedad inferior al 40%, valor no adecuado para el desarrollo larval.

Figura 60.

Tasa de supervivencia de las larvas de MSN.



Nota. En la figura se puede apreciar las tasas de supervivencia obtenidas para cada sustrato implementado en el proceso de degradación larvaria.

Como se mencionó anteriormente, algunos parámetros se calcularon solamente para las dietas de residuos frescos y mezclas, uno de estos fue la tasa de bioconversión (Ecuación 3), empleada por Gold [83] y Villa [33] en sus investigaciones; este factor permite observar la eficiencia del consumo del sustrato por parte de las larvas.

Ecuación 3.

$$Tasa\ de\ bioconversi\acute{o}n\ (\%DM) = \frac{Ganancia\ larval\ (g)}{Masa\ seca\ del\ alimento\ total\ adicionado\ (g)} * 100$$

Para la determinación de la ganancia larval se usó la ecuación 4, en donde se empleó el valor de masa seca de las larvas al inicio y final del proceso. Debido a que no se realizó una caracterización de las larvas al inicio del proceso de biodegradación se tomó como referencia el valor reportado por Parodi [54] para materia seca, 26,1% ± 1,1.

Ecuación 4.

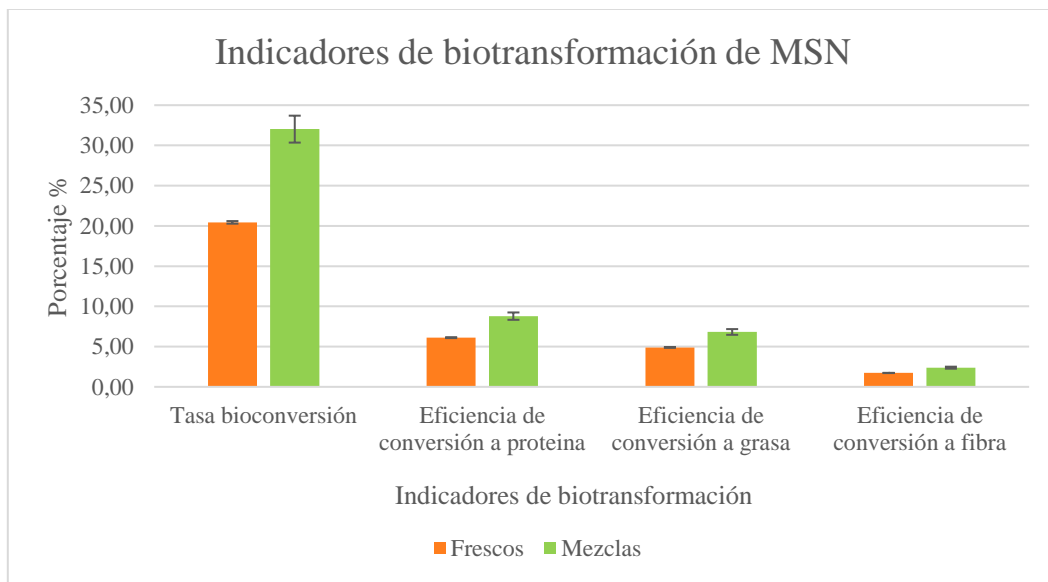
$$\text{Ganancia larval}(g) = (\text{Masa seca larvas finales } (g) - \text{Masa seca larvas iniciales } (g))$$

La ganancia larval se calculó para cada repetición de cada experimento y se realizó un promedio al final con su respectiva desviación estándar.

Los resultados obtenidos a partir de la Ecuación 3 se pueden observar en la Figura 61. Por medio de esta se puede apreciar que la mejor tasa de bioconversión fue la de mezclas con un $32,02\% \pm 1,67$ en comparación con la dieta de residuos frescos que fue de $20,44\% \pm 0,16$.

Figura 61.

Indicadores de biotransformación para las larvas alimentadas con residuos frescos y mezclas.



Nota. La figura muestra la tasa de bioconversión para mezclas y residuos frescos además de la eficiencia de bioconversión de los macronutrientes.

Los valores obtenidos para la tasa de bioconversión del sustrato son superiores en su mayoría a los observados en la literatura para sustratos similares a los empleados, lo cual sugiere una potencial mejora en cuanto al proceso usado, la composición del sustrato y demás; por ejemplo, Gold [83] reporta una tasa de bioconversión de $15,3\% \pm 2,1$ para larvas alimentadas

con residuos de restaurantes, mientras que para larvas alimentadas con residuos vegetales reporta una tasa de bioconversión de $22,7\% \pm 1,1$; así mismo, Nyakeri [73] establece una tasa de bioconversión de $20,8\%$ para larvas alimentadas con residuos de alimentos; por otro lado, Lalander [81] reporta valores de bioconversión de $13,9 \pm 0,3$ para residuos de alimentos y $4,1 \pm 0,2$ para residuos de vegetales y frutas.

Las altas tasas de bioconversión obtenidas señalan la alta capacidad de las larvas para digerir el sustrato suministrado y así reducir su biomasa, esto se puede atribuir a los nutrientes que componen la dieta y a la humedad del sustrato; así mismo, las altas tasas de bioconversión permiten observar que hubo una alta efectividad en cuanto a la transformación de los nutrientes en biomasa larval, lo cual se puede constatar con las tasas de bioconversión de los macronutrientes, estas dependen directamente del medio de la composición del alimento, las condiciones de este y el tiempo de desarrollo.

Así mismo, se determinaron las eficiencias de conversión de proteína (Ecuación 5), grasa (Ecuación 6) y fibra (Ecuación 7), las ecuaciones usadas han sido implementadas en sus investigaciones por Gold [83] y Villa [33]. Para el desarrollo de las ecuaciones se usaron los datos arrojados por el laboratorio AGRILAB en cuanto a la composición de las larvas en base seca.

Ecuación 5.

$$\text{Eficiencia de conversión a proteína} = \frac{\text{Proteína acumulada en las larvas (g)}}{\text{Masa seca inicial del medio de cultivo}} * 100$$

Ecuación 6.

$$\text{Eficiencia de conversión a grasa} = \frac{\text{Grasa acumulada en las larvas (g)}}{\text{Masa seca inicial del medio de cultivo}} * 100$$

Ecuación 7.

$$\text{Eficiencia de conversión a fibra} = \frac{\text{Fibra acumulada en las larvas (g)}}{\text{Masa seca inicial del medio de cultivo}} * 100$$

Los resultados que se obtuvieron por medio de las ecuaciones 5,6 y 7 se pueden observar en la figura 61, a partir de esto, se puede establecer que las mejores tasas de eficiencia de bioconversión a proteína ($8,79\% \pm 0,46$), grasa ($6,82\% \pm 0,36$) y fibra ($2,38\% \pm 0,12$) son las de las larvas alimentadas con la dieta de mezclas, estos valores se pueden comparar con los resultados generados por Villa [33] en donde se obtienen eficiencias de conversión a proteína en un rango de 6 - 11% usando un sustrato con residuos de alimentos; en el caso del presente proyecto, el rango de eficiencia de conversión a proteína usando residuos de alimentos es de 6 - 9% lo cual permite establecer que se obtuvo una eficiencia de conversión acorde con lo revisado en la literatura. Igualmente, los valores obtenidos para la eficiencia de conversión a grasa y fibra por parte de las larvas alimentadas con residuos frescos fueron de $4,90\% \pm 0,05$ y $1,73\% \pm 0,02$ respectivamente, sin embargo, no fue posible realizar una comparación en cuanto a este tipo de eficiencias ya que no se encontraron valores reportados por ningún autor en la revisión bibliográfica realizada.

Por otro lado, se calculó la eficiencia en conversión del residuo usando la ecuación 8, esta ha sido implementada por Gold [83] y Villa [33] en el desarrollo de sus ensayos. La eficiencia en conversión del residuo mide el porcentaje de pérdida de materia seca de la dieta que se convirtió en biomasa de insectos [84]. Para obtener la ganancia larval se usó la Ecuación 4.

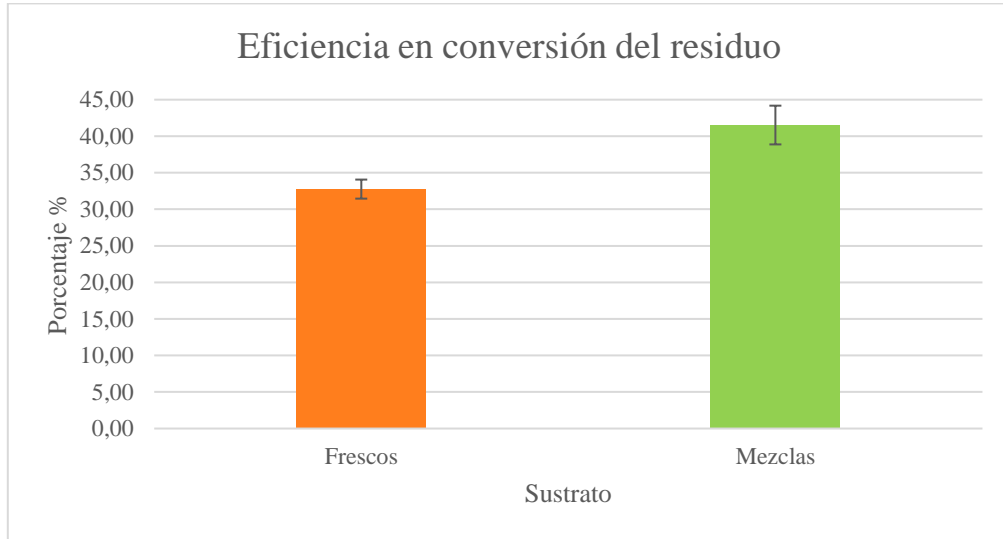
Ecuación 8.

$$\text{Eficiencia en conversión del residuo} = \frac{\text{Ganancia larval}}{\text{Masa seca del alimento (g)} - \text{Masa seca del frass (g)}} * 100$$

Los valores obtenidos (Figura 62) se relacionan correctamente con otros indicadores como la tasa de bioconversión y la eficiencia de bioconversión por nutrientes, ya que la dieta de mezclas obtuvo la mejor eficiencia en conversión del residuo ($41,53\% \pm 2,65$) en comparación con la dieta de residuos frescos ($32,76\% \pm 1,30$) como en todos los indicadores analizados previamente.

Figura 62.

Eficiencia en conversión de residuos frescos y mezclas.



Nota. La figura muestra la eficiencia en conversión obtenida al finalizar el proceso de biodegradación para residuos frescos y mezclas.

Finalmente, se evaluó para los 4 experimentos la tasa de reducción del residuo, la cual indica la cantidad de residuos degradados con respecto a la cantidad inicial. Para esto se empleó la ecuación 9 usada por Villa [33] y Gold [83].

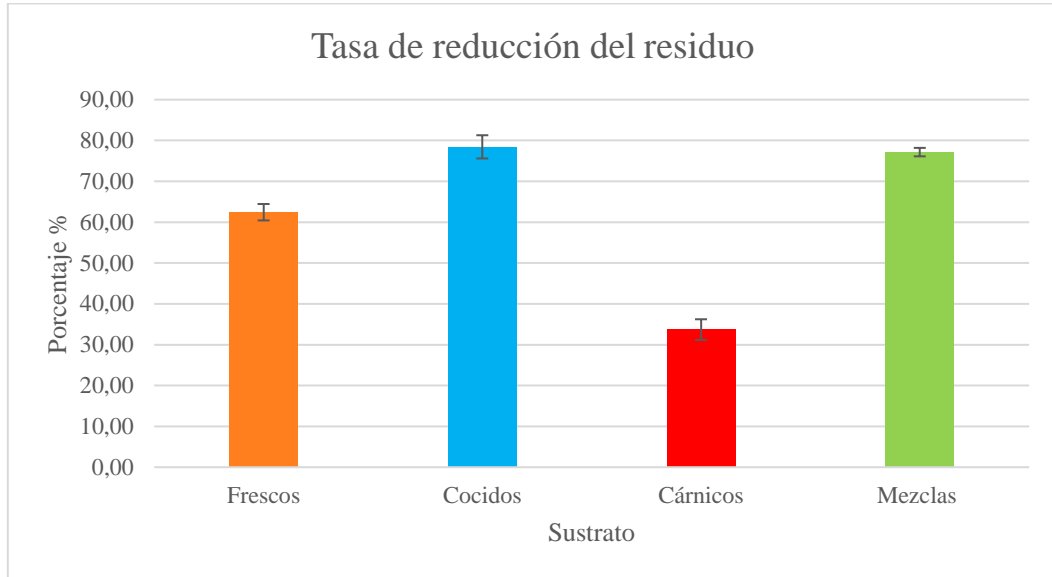
Ecuación 9.

$$\text{Reducción del residuo (\%)} = \left(1 - \frac{\text{Masa seca del frass (g)}}{\text{Masa seca inicial del medio de cultivo}} \right) * 100$$

Los resultados obtenidos (Figura 63) indican una alta tasa de reducción del residuo con respecto a los residuos frescos (62,44% ± 2,01), residuos cocidos (78,44% ± 2,84) y mezclas (77,16% ± 1,04). Por el contrario, los residuos cárnicos tuvieron una tasa de reducción baja (33,70% ± 2,53) con respecto a los demás sustratos empleados, esto es consecuencia como ya se ha mencionado anteriormente, de la baja afinidad de las larvas con el sustrato principalmente por su alto contenido de grasa y poco contenido proteico, además, la textura del residuo (espeso, grasoso, viscoso) no fue la adecuada para permitir el movimiento de las larvas dentro del sustrato y así facilitar el proceso de alimentación.

Figura 63.

Tasa de reducción de los sustratos.



Nota. La figura muestra las tasas de reducción de residuos obtenidas para los 4 sustratos empleados en el proceso de degradación de biorresiduos con MSN.

Ensayos realizados por Nyakeri [73] permiten establecer tasas de reducción de 81,8% para desechos de alimentos provenientes de restaurantes, igualmente, Klammsteiner [67] señala valores de $85,3\% \pm 0,7$ para una dieta de residuos de alimentos, Lalander [81] en sus ensayos obtuvo resultados de reducción del sustrato de $55,3\% \pm 4,1$ y $46,7\% \pm 3,1$ para residuos de alimentos y residuos de vegetales respectivamente. Por medio de esta revisión bibliográfica en cuanto a tasa de reducción del sustrato empleando dietas basadas en residuos de alimentos se puede establecer un rango de reducción del sustrato de 46 – 85%; en comparación con los resultados obtenidos en el presente ensayo se puede asumir que se generaron valores acordes con los ensayos previamente realizados usando dietas semejantes lo cual establece que hay una buena eficiencia en el proceso en cuanto a la degradación de residuos que es uno de los objetivos principales que se busca cumplir en la degradación de estos con larvas de *Hermetia Illucens Sp.*

4.2.6 Balance de materia para los sustratos usados en el proceso de degradación larvaria

4.2.6.a Residuos frescos. Cumpliendo con los objetivos del presente trabajo se realizaron pruebas determinadas a los residuos provenientes de la zona motivo de estudio, en este caso El Mochuelo, estas pruebas permiten realizar un balance de materia más específico. Se realizaron los análisis iniciales de los residuos en el laboratorio AGRILAB, Anexo 3- Resultados del análisis de caracterización y composición de residuos frescos y Anexo 4- Resultados del análisis bromatológico especial de residuos frescos, tanto como los análisis del Frass el cual está compuesto de los residuos del sustrato, el excremento de larvas y os restos de larvas muertas, Anexo 7- Resultados del análisis de caracterización y composición del Frass de residuos frescos.

En la tabla 12 y en la tabla 13 se observan los resultados de la caracterización y composición del Frass y la caracterización de la fracción mineral respectivamente, estos valores provienen del análisis realizado en AGRILAB. Como referencia de estos resultados se tiene la NTC 5167, en la tabla 33 se observan los valores esperados en este análisis.

Tabla 12

Caracterización y composición del Frass proveniente de la biodegradación de residuos frescos a partir de MSN.

| VARIABLE | RESULTADO | UNIDADES | TÉCNICA |
|------------------------------------|-----------|-------------------|-------------------------------|
| Humedad | 27,5 | % | NTC 5167 - Gravimétrico |
| pH | 8,71 | Unidades de pH | NTC 5167 - Potenciométrico |
| Conductividad eléctrica | 6,34 | dS/m | NTC 5167 - Conductímetro |
| Cenizas | 21,4 | % | NTC 5167 - Gravimétrico |
| Pérdidas por volatilización | 51,1 | % | NTC 5167 - Gravimétrico |
| Densidad real (BS) | 0,558 | g/cm ³ | NTC 5167 - Gravimétrico |

| | | | |
|--|------|--------------|--------------------------|
| Carbono orgánico oxidable total | 17,8 | % | NTC 5167 - Colorimétrico |
| Relación C/N | 12 | Adimensional | Relación matemática |

Nota. Esta tabla muestra los valores obtenidos por parte de AGRILAB de la caracterización y composición del Frass obtenido en el experimento de los residuos frescos los cuales provienen de El Mochuelo.

Tabla 13

Caracterización de la fracción mineral del Frass proveniente de la biodegradación de residuos frescos a partir de MSN.

| VARIABLE | RESULTADO | UNIDADES | TÉCNICA |
|---------------------------|-----------|----------|---|
| Nitrógeno Total | 1,46 | % | - |
| Nitrógeno Orgánico | 1,46 | % | NTC 370 - Volumétrico |
| Fósforo Total | 0,455 | % | NTC 234 - Colorimétrico |
| Potasio Total | 2,42 | % | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Calcio Total | 6,72 | % | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Magnesio Total | 0,363 | % | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Azufre Total | 0,201 | % | NTC 1154 / Turbidímetro |
| Hierro Total | 0,189 | % | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Manganeso Total | 60,5 | mg/kg | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Cobre Total | 25,7 | mg/kg | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Zinc Total | 67,2 | mg/kg | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |
| Boro Total | 40,9 | mg/kg | NTC 1860 - Colorimétrico |
| Sodio Total | 0,138 | % | EAA (Espectroscopía de absorción atómica) |

Nota. La tabla muestra los valores obtenidos por AGRILAB en la fracción mineral del Frass obtenido en el experimento de los residuos frescos los cuales provienen de El Mochuelo.

Figura 64.

Contenido límite para variables y componentes del Frass según la NTC 5167

| VARIABLE | CONTENIDO LÍMITE | ¿SE CUMPLE? |
|---|-------------------------|--------------------|
| Carbono orgánico oxidable total | Mínimo 15% | Si |
| Nitrógeno total | Mínimo 1% | Si |
| Fósforo total | Mínimo 1% | No |
| Potasio total | Mínimo 1% | Si |
| Relación C/N | Máximo 25 | Si |
| pH | Mínimo 4 Máximo 9 | Si |
| Contenido de humedad para materiales de origen vegetal | Máximo 30% | Si |
| Densidad real | Máximo 0,6 g/ml | Si |
| Cenizas | Máximo 60% | Si |

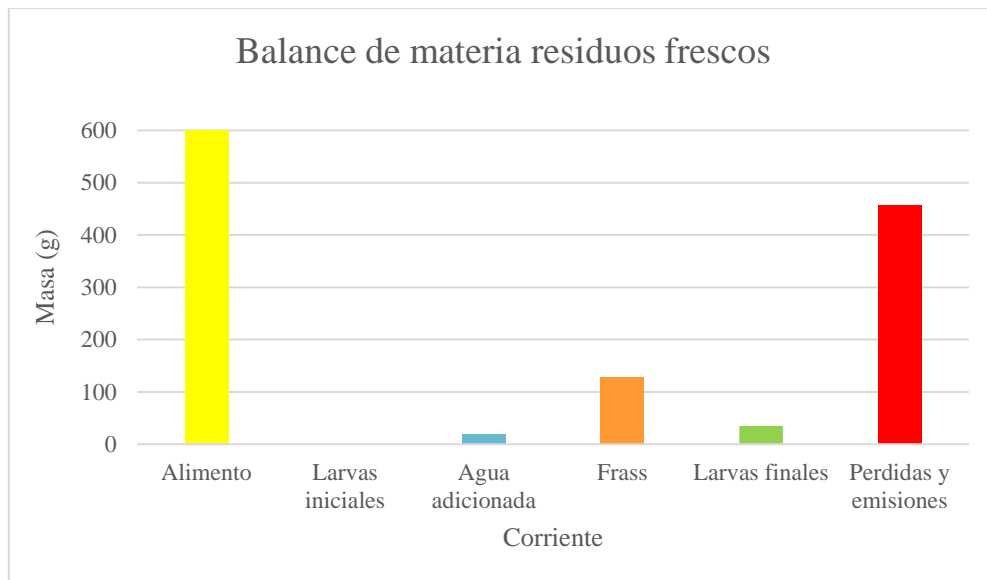
Nota. En esta tabla se observan los valores límites de las variables medidas por parte de AGRILAB basados en la NTC 5167, también se describe si los valores obtenidos cumplen con la norma.

A continuación, se presentarán diversas gráficas correspondientes al balance de materia en los residuos frescos, inicialmente se observa el balance global de materia (Figura 65), en donde el alimento, las larvas iniciales y el agua adicionada son las corrientes de entrada y a su vez el Frass, las larvas finales y las pérdidas y emisiones corresponden a las corrientes de salida. Como se mencionó anteriormente, se adicionó una cantidad específica de sustrato en cada una de los tres recipientes correspondientes a los residuos frescos, el promedio de estos tres fue de 600 g que corresponde a la corriente del alimento, adicionalmente se añadieron las 500 larvas por recipiente las cuales cuentan con un peso promedio de 0,88 g y finalmente en el día 21 del experimento se tuvo que ajustar la humedad del sustrato debido a que la humedad en este fue inferior al 50%, para realizar este ajuste se añadió un promedio de 18,56 g de agua a cada uno de los recipientes de este experimento. Teniendo en cuenta las corrientes de entrada mencionadas anteriormente se obtuvo un total de 619,46 g.

El total en las corrientes de salida en este balance corresponde a 619,46 g, el cual está compuesto de 127,67 g de Frass que se obtuvo al finalizar el experimento, 35,22 g de larvas vivas y 456,57 g de pérdidas y emisiones. Las pérdidas hacen referencia a la cantidad de sustrato que se extrajo del experimento el cual se usó para suplir las mediciones necesarias para el control de temperatura, humedad, pH y porcentaje de cenizas, como también se asumen pérdidas al manipular las larvas para sus debidas mediciones. A su vez las emisiones corresponden a la pérdida de humedad por evaporación y a los gases emitidos en el proceso.

Figura 65.

Balance global de materia de residuos frescos



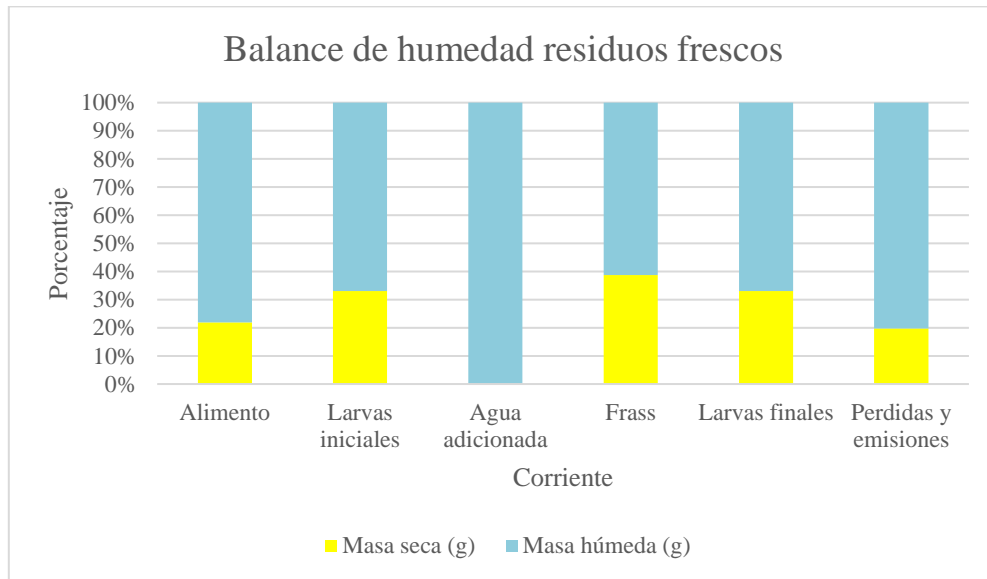
Nota. En esta figura se observa un gráfico de barras para representar el balance global de materia efectuado en los residuos frescos, las corrientes de entrada corresponden a las tres primeras barras y las corrientes de salida están representadas por las últimas tres barras.

En la figura 66 se observa el balance de humedad realizado a los residuos frescos, en esta gráfica se identifica el porcentaje de materia seca y materia húmeda de cada una de las corrientes presentes. La corriente del alimento cuenta con un 21,94% de materia seca y un 78,06% de materia húmeda, se asume que las larvas de entrada cuentan con el mismo porcentaje de humedad que las larvas de salida, *Anexo 5- Resultados del análisis bromatológico especial para larvas instar 5*, estas dos corrientes cuentan con un porcentaje de materia seca del 33,10% y con un porcentaje de materia húmeda de 66,90%, el agua adicionada al proceso está representada por

un 100% de materia húmeda, el Frass contiene 38,73% de materia seca y 61,27% de materia húmeda, y por último las pérdidas y emisiones se componen de 19,71% de materia seca y 80,29% de materia húmeda. Cabe mencionar que dicho balance fue realizado en base a resultados obtenidos por el laboratorio externo AGRILAB.

Figura 66.

Balance de humedad de residuos frescos

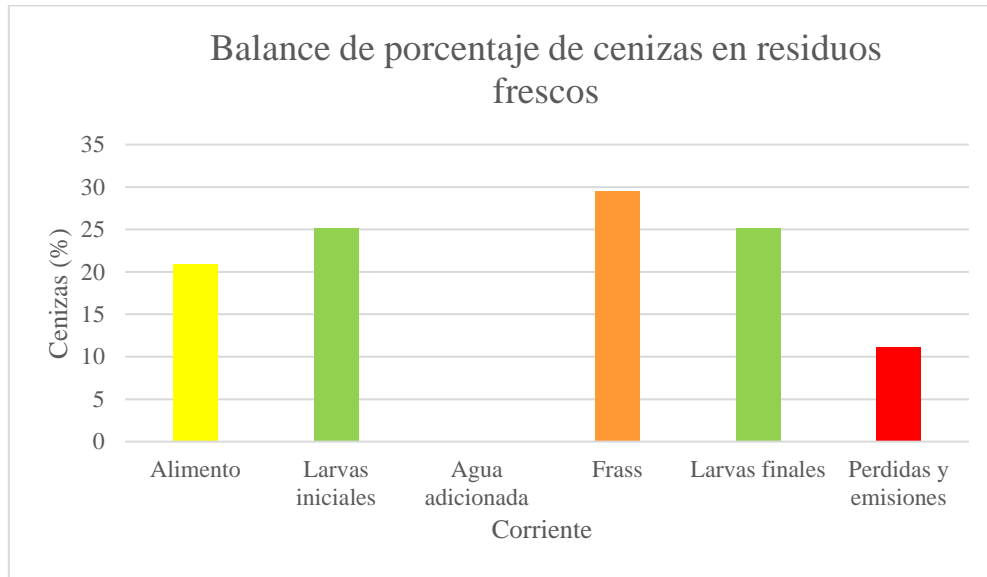


Nota. Esta figura hace referencia al contenido de humedad en cada una de las corrientes presentes en el proceso. La barra azul representa la masa húmeda y la barra amarilla representa la masa seca.

El balance del porcentaje de cenizas presente en el proceso de residuos frescos corresponde a la figura 67, cada uno de los valores expresados corresponden a los resultados de los análisis realizados en AGRILAB. El alimento contiene un porcentaje de cenizas del 20,90%, nuevamente se asume el mismo valor tanto como para las larvas iniciales como para las larvas finales correspondiente a 25,20%, en el agua adicionada no están presentes las cenizas debido a que no contiene ningún porcentaje de material seco, el Frass está compuesto por 29,51% de cenizas y por último las pérdidas y emisiones contienen el menor porcentaje de cenizas del proceso, en este caso un 11,17%. Teniendo en cuenta cada uno de los porcentajes obtenidos y la cantidad de materia seca de cada corriente se obtuvo un total de cenizas en las corrientes de entrada de 27,59 g y a su vez se obtuvo el mismo valor en el conjunto de las corrientes de salida.

Figura 67.

Balance de porcentaje de cenizas en residuos frescos

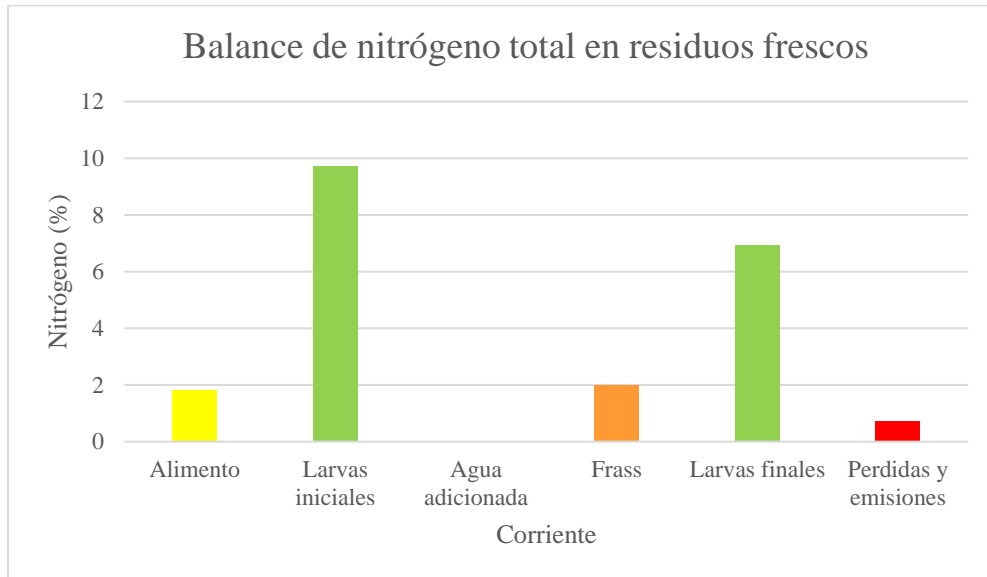


Nota. Esta tabla muestra a través de un diagrama de barras el porcentaje de cenizas presente en cada una de las corrientes del proceso.

La figura 68 hace referencia al balance de nitrógeno total obtenido en cada una de las corrientes del experimento de residuos frescos. El alimento contiene un 1,83% de nitrógeno, según Parodi [54], las larvas iniciales cuentan con un 9,72 de nitrógeno, para el agua adicionada no se tiene en cuenta este valor debido a que no contiene materia que pueda obtener nitrógeno, el Frass obtuvo un valor de 2,01% y por último las pérdidas y emisiones contienen 0,71% de nitrógeno total. Se obtuvo un total de 2,44 g de nitrógeno total tanto en la entrada como en la salida del proceso.

Figura 68.

Balance de nitrógeno total en residuos frescos

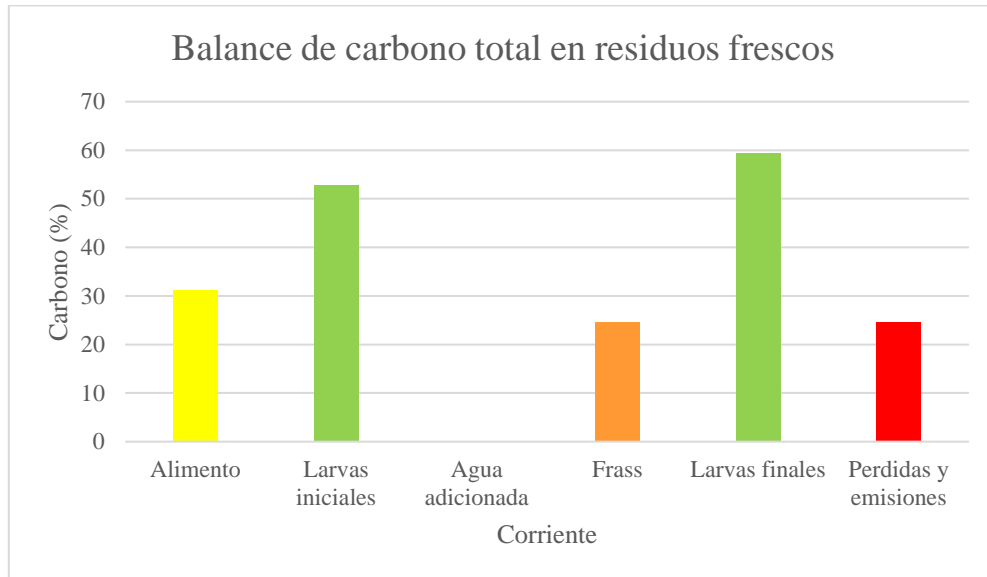


Nota. En esta figura se observa el contenido total de nitrógeno en cada una de las corrientes presentes en el proceso.

Para el balance de carbono total que se evidenció en los residuos frescos se usa como referencia la figura 6, en esta se observa que el alimento contiene un 31,14% de carbono, según Parodi [54], las larvas iniciales cuentan con 52,80% de carbono y las larvas de salida tienen un porcentaje de 59,50%, el Frass cuenta con 24,55% y finalmente las pérdidas y emisiones se constituyen con 24,52% de carbono. El total de carbono en el proceso de residuos frescos de entrada y salida es de 41,14 g.

Figura 69.

Balance de carbono total en residuos frescos



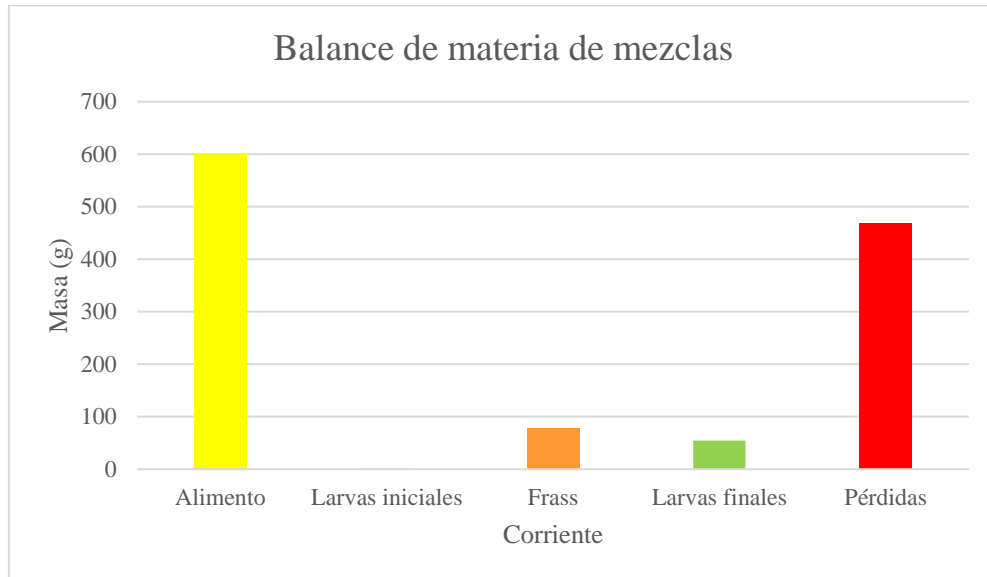
Nota. En esta figura se observa el contenido de carbono total presente en cada una de las corrientes presentes en el proceso.

4.2.6.b Mezclas. El balance para el experimento de mezclas se realizó de manera muy global, debido a que para este sustrato no se realizaron pruebas iniciales de composición ni análisis bromatológico que permitirían hacer un balance de materia más puntual. Los valores usados para esta sección fueron tomados experimentalmente a partir del Anexo 2- Protocolo para los análisis de parámetros físicos de los biorresiduos.

La figura 70 describe el balance global de materia en las mezclas, a partir de la tabla 19 se realizó el promedio de la masa del sustrato del ensayo y sus respectivas réplicas, este promedio corresponde a 600 g de alimento, el peso promedio de las larvas agregadas a cada una de las bandejas es de 0,74 g; las larvas iniciales junto con el alimento corresponden a las corrientes de entrada de este proceso, cuentan con un peso inicial de 600,74 g. El Frass, las larvas finales y las pérdidas y emisiones hacen parte de las corrientes de salida de este proceso, estas tres se componen de 600,74 g. El peso del Frass corresponde a 77,17 g, el de las larvas 54,69 g y por último el peso de las pérdidas y emisiones fue de 468,88 g correspondiente a los gases emitidos, pérdidas por manipulación y el sustrato extraído para las respectivas mediciones de control.

Figura 70.

Balance global de materia en las mezclas

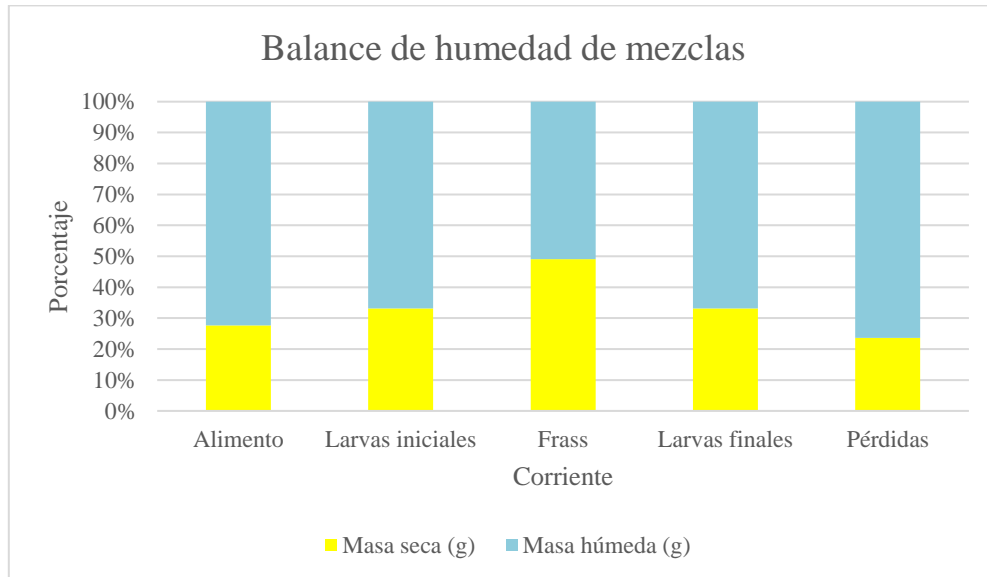


Nota. En esta figura se observa un gráfico de barras para representar el balance global de materia efectuado en las mezclas, las corrientes de entrada corresponden a las tres primeras barras y las corrientes de salida están representadas por las últimas tres barras.

En la figura 71 se observa la gráfica que hace referencia al balance de humedad en las mezclas, en esta se presenta la diferencia entre la materia seca (barra amarilla) y la materia húmeda (barra azul) de cada una de las corrientes del proceso. El alimento cuenta con 27,62% de materia seca y con 72,38% de materia húmeda, al asumir que las larvas tanto de entrada como de salida cuentan con el mismo porcentaje de humedad se evidencia que contienen 33,10% de materia seca y 66,90% de materia húmeda, el Frass contiene un porcentaje de materia seca de 49,06% y 50,94% de materia húmeda; finalmente se obtuvo un 23,57% de materia seca y un 76,43% de materia húmeda en la corriente de pérdidas y emisiones.

Figura 71.

Balance de humedad en las mezclas

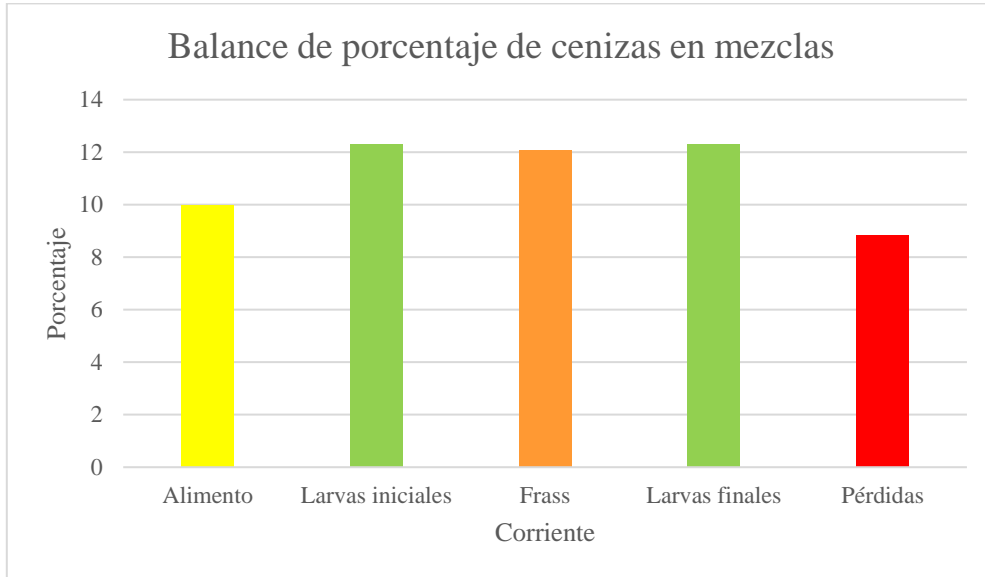


Nota. Esta figura hace referencia al contenido de humedad en cada una de las corrientes presentes en el proceso. La barra azul representa la masa húmeda y la barra amarilla representa la masa seca.

Para finalizar el balance de este proceso se tiene la figura 72 en donde se expresa el porcentaje de cenizas presente en cada una de las corrientes, estos valores salen de la experimentación. Inicialmente el alimento cuenta con 9,97%, se asume que las larvas de entrada y salida cuentan con el mismo porcentaje de cenizas, en este caso 12,30%, el Frass contiene un porcentaje de 12,08% y por último las pérdidas y emisiones un 8,83% de cenizas. Se obtuvo un total de 16,55 g tanto en la entrada como en la salida.

Figura 72.

Balance de porcentaje de cenizas en las mezclas



Nota. Esta tabla muestra a través de un diagrama de barras el porcentaje de cenizas presente en cada una de las corrientes del proceso.

5. CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica realizada se seleccionaron las condiciones adecuadas para el proceso de biodegradación larvaria como temperatura y humedad relativa con un valor de 27°C y un rango de 70 a 90% respectivamente. Igualmente, se estableció un rango del 60 al 80% para el contenido de humedad de cada sustrato y una densidad larvaria de 1,4 larvas/cm².

Tras la caracterización de los residuos orgánicos provenientes del barrio El Mochuelo bajo (residuos frescos) se estableció que su contenido de humedad es de 78,06% ± 24, el cual se encuentra dentro del rango establecido para el contenido de humedad de los sustratos, por tal motivo no fue necesario realizar ningún ajuste a este valor. Adicionalmente, el contenido de grasa de estos residuos corresponde a 11,42% ± 0,35, por lo cual no se estima que sea un valor elevado con respecto al contenido de grasa de los demás residuos. Igualmente, se determinó el pH obteniendo un valor de 5,48 ± 1,32 E-04 encontrándose por encima del rango que pondría en riesgo el desarrollo larval (0 - 1,8).

A partir de la investigación y los análisis realizados se evaluó el contenido proteico de las larvas en los instares 5 y 6 obteniendo así 43,2% y 39,8% respectivamente, demostrando que el aspecto que más influenció la acumulación de proteína dentro de las larvas fue el alimento suministrado.

Los resultados obtenidos en cuanto a las tallas de las larvas al finalizar el proceso de degradación larval llevan a concluir que el mejor sustrato en cuanto a esto fue la dieta de mezclas, debido a que obtuvo los mejores valores para longitud, peso y ancho por encima de los demás sustratos implementados en la investigación. Igualmente, por medio del análisis de la varianza de un factor (ANOVA) se logró establecer que existe una diferencia significativa entre el peso obtenido de las larvas de los 4 sustratos, posicionando a las mezclas como el sustrato más favorable para su crecimiento.

Por medio de los indicadores de biotransformación se evidenció que la mejor tasa de biotransformación fue para el sustrato de mezclas en conjunto con las eficiencias de conversión para

proteína, grasa y fibra, demostrando así que el sustrato más asimilado por las larvas fueron las mezclas, esto se debe a su facilidad de digestibilidad, contenido de nutrientes y humedad del sustrato.

Con relación a los resultados generados en la investigación se pudo establecer que un exceso de grasa limita de gran manera el crecimiento de las larvas como se observó con las larvas alimentadas con residuos cárnicos que tenían un contenido de grasa de $80,55 \pm 1,32$, lo cual explica la deficiencia en las tallas obtenidas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Basura en Bogotá, una responsabilidad de todos los ciudadanos | Bogota.gov.co.” <https://bogota.gov.co/yo-participo/blogs/basura-en-bogota-una-responsabilidad-de-todos-los-ciudadanos> (accessed Aug. 24, 2022).
- [2] “Planta de tratamiento de residuos orgánicos en Bogotá | Bogota.gov.co.” <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/planta-de-tratamiento-de-residuos-organicos-en-bogota> (accessed Aug. 24, 2022).
- [3] “Especiales UAESP: Relleno Doña Juana.” <https://www.uaesp.gov.co/especiales/relleno/> (accessed May 30, 2022).
- [4] D. Purkayastha and S. Sarkar, “Using black soldier fly for waste management in developing countries,” *Clean Energy Resour. Recover.*, pp. 295–312, 2021, doi: 10.1016/c2020-0-00530-x.
- [5] I. Zabaleta, A. Mertenat, L. Scholten, and C. Zurbrügg, *Selecting Organic Waste Treatment Technologies*. 2020. [Online]. Available: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/schwerpunkte/swm/SO_WATT/sowatt.pdf
- [6] A. Salcedo Cámara, “Guía Para La Gestión De Biorresiduos,” 2016.
- [7] Organización de las Naciones Unidas - Medio Ambiente (ONU), *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe*. 2018.
- [8] G. Capson-Tojo, R. Escudié, J.-P. Steyer, and A. Robles, *Resource recovery from food waste via biological processes*, First Edit. Elsevier Inc., 2021. doi: 10.1016/b978-0-323-85223-4.00013-0.
- [9] S. Pottipati, R. Chakma, I. Haq, and A. S. Kalamdhad, *Composting and vermicomposting: Process optimization for the management of organic waste*, First Edit. Elsevier Ltd., 2022. doi: 10.1016/b978-0-323-85792-5.00015-0.
- [10] D. Chavan, S. Arya, and S. Kumar, *Open dumping of organic waste: Associated fire, environmental pollution and health hazards*, First Edit. Elsevier Ltd., 2022. doi: 10.1016/B978-0-323-85792-5.00014-9.
- [11] S. Singh and R. K. Sinha, *Vermicomposting of organic wastes by earthworms: Making wealth from waste by converting ‘garbage into gold’ for farmers*, First Edit. Elsevier Ltd., 2022. doi: 10.1016/b978-0-323-85792-5.00004-6.
- [12] P. Adhikari, N. Aryal, A. Ghimire, and P. Khanal, “Sustainable biowaste recycling using

- insects,” *Clean Energy Resour. Recover.*, vol. 1, pp. 399–420, 2021, doi: 10.1016/c2020-0-00530-x.
- [13] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata, and V. F. Woerden, *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington Dc, 2018. doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.
- [14] F. Girotto and R. Cossu, “Role of animals in waste management with a focus on invertebrates’ biorefinery: An overview,” *Environ. Dev.*, vol. 32, no. July 2018, p. 100454, 2019, doi: 10.1016/j.envdev.2019.08.001.
- [15] S. Ojha, S. Bußler, and O. K. Schlüter, “Food waste valorisation and circular economy concepts in insect production and processing,” *Waste Manag.*, vol. 118, pp. 600–609, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.09.010.
- [16] A. Basto, E. Matos, and L. M. P. Valente, “Nutritional value of different insect larvae meals as protein sources for European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles,” *Aquaculture*, vol. 521, no. December 2019, p. 735085, 2020, doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.735085.
- [17] A. T. Ubando, A. J. R. Del Rosario, W. H. Chen, and A. B. Culaba, “A state-of-the-art review of biowaste biorefinery,” *Environ. Pollut.*, vol. 269, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116149.
- [18] FAO, “La contribución de los insectos a la seguridad alimentaria, los medios de vida y el medio ambiente,” *Fao*, pp. 1–4, 2018, [Online]. Available: <http://www.fao.org/edible-insects/en/>
- [19] P. Pramanik and Y. R. Chung, “Changes in fungal population of fly ash and vinasse mixture during vermicomposting by *Eudrilus eugeniae* and *Eisenia fetida*: Documentation of cellulase isozymes in vermicompost,” *Waste Manag.*, vol. 31, no. 6, pp. 1169–1175, 2011.
- [20] K. Sharma and V. K. Garg, *Vermicomposting of waste: A zero-waste approach for waste management*. Elsevier B.V., 2019. doi: 10.1016/B978-0-444-64200-4.00010-4.
- [21] M. A. Henry, F. Gai, P. Enes, A. Pérez-Jiménez, and L. Gasco, “Effect of partial dietary replacement of fishmeal by yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae meal on the innate immune response and intestinal antioxidant enzymes of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*),” *Fish Shellfish Immunol.*, vol. 83, no. September, pp. 308–313, 2018, doi: 10.1016/j.fsi.2018.09.040.
- [22] J. L. Domínguez and G. F. Carlos, “PREFERENCIA DEL PICUDO NEGRO (*Rhynchophorus palmarum*) EN CUATRO VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum*),” *UIN Maulana Malik Ibrahim*, vol. 39, no. 1, pp. 1–15, 2014,

- [Online]. Available:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025><http://dx.doi.org/10.1038/nature10402><http://dx.doi.org/10.1038/nature21059><http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127><http://dx.doi.org/10.1038/nrmicro2577><http://>
- [23] “Prueban novedosos sustratos para la cría artesanal de mojoyoy,” 2022.
<http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/prueban-novedosos-sustratos-para-la-cria-artesanal-de-mojoyoy> (accessed Apr. 14, 2022).
- [24] G. E. Vargas, G. Espinoza, C. Ruiz, and R. Rojas, “Valor nutricional de la larva de *Rhynchophorus palmarum* L.: comida tradicional en la amazonía peruana,” *Rev. la Soc. Química del Perú*, vol. 79, no. 1, pp. 64–70, 2013, Accessed: Apr. 15, 2022. [Online]. Available: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2013000100009&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [25] M. Tolrá and Hjorth-Andersen, “Orden Diptera,” *Rev. IDE@-SEA*, vol. 63, pp. 1–22, 2015, [Online]. Available: www.sea-entomologia.org/IDE@
- [26] H. Čičková, G. L. Newton, R. C. Lacy, and M. Kozánek, “The use of fly larvae for organic waste treatment,” *Waste Manag.*, vol. 35, pp. 68–80, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2014.09.026.
- [27] H. N. Hall, H. V. M. O’Neill, D. Scholey, E. Burton, M. Dickinson, and E. C. Fitches, “Amino acid digestibility of larval meal (*Musca domestica*) for broiler chickens,” *Poult. Sci.*, vol. 97, no. 4, pp. 1290–1297, 2018, doi: 10.3382/ps/pex433.
- [28] Y. S. Wang and M. Shelomi, “Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food,” *Foods*, vol. 6, no. 10, 2017, doi: 10.3390/foods6100091.
- [29] A. Singh and K. Kumari, “An inclusive approach for organic waste treatment and valorisation using Black Soldier Fly larvae: A review,” *J. Environ. Manage.*, vol. 251, no. April, p. 109569, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109569.
- [30] A. Mertenat, S. Diener, and C. Zurbrügg, “Black Soldier Fly biowaste treatment – Assessment of global warming potential,” *Waste Manag.*, vol. 84, pp. 173–181, 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2018.11.040.
- [31] S. A. Siddiqui *et al.*, “Black soldier fly larvae (BSFL) and their affinity for organic waste processing,” *Waste Manag.*, vol. 140, no. October 2021, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2021.12.044.
- [32] R. Villa, H. M. B. Muñoz, N. Jawiarczyk, and A. M. Vaya, “Black soldier fly biorefinery: A novel upcycling route for municipal biosolids,” *Clean Energy Resour. Recover.*, pp. 487–500, 2021, doi: 10.1016/c2020-0-00530-x.

- [33] A. Isibika, B. Vinnerås, O. Kibazohi, C. Zurbrügg, and C. Lalander, “Pre-treatment of banana peel to improve composting by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae,” *Waste Manag.*, vol. 100, pp. 151–160, 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.09.017.
- [34] R. Salomone, G. Saija, G. Mondello, A. Giannetto, S. Fasulo, and D. Savastano, “Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*,” *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 890–905, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.154.
- [35] M. Gold, J. K. Tomberlin, S. Diener, C. Zurbrügg, and A. Mathys, “Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review,” *Waste Manag.*, vol. 82, pp. 302–318, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.10.022.
- [36] A. T. Dossey, J. T. Tatum, and W. L. McGill, *Modern Insect-Based Food Industry: Current Status, Insect Processing Technology, and Recommendations Moving Forward*, no. 7. Elsevier Inc., 2016. doi: 10.1016/b978-0-12-802856-8.00005-3.
- [37] V. Jarošík, L. Kratochvíl, A. Honěk, and A. F. G. Dixon, “A general rule for the dependence of developmental rate on temperature in ectothermic animals,” *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 271, no. SUPPL. 4, pp. 219–221, 2004, doi: 10.1098/rsbl.2003.0145.
- [38] L. A. Holmes, S. L. VanLaerhoven, and J. K. Tomberlin, “Lower temperature threshold of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) development,” *J. Insects as Food Feed*, vol. 2, no. 4, pp. 255–262, 2016, doi: 10.3920/JIFF2016.0008.
- [39] L. A. Holmes, S. L. Vanlaerhoven, and J. K. Tomberlin, “Relative humidity effects on the life history of *hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae),” *Environ. Entomol.*, vol. 41, no. 4, pp. 971–978, 2012, doi: 10.1603/EN12054.
- [40] J. Y. K. Cheng, S. L. H. Chiu, and I. M. C. Lo, “Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion,” *Waste Manag.*, vol. 67, pp. 315–323, 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.05.046.
- [41] J. Ma *et al.*, “Dynamic Effects of Initial pH of Substrate on Biological Growth and Metamorphosis of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae),” *Environ. Entomol.*, vol. 47, no. 1, pp. 159–165, 2018, doi: 10.1093/ee/nvx186.
- [42] L. Palma, S. J. Ceballos, P. C. Johnson, D. Niemeier, M. Pitesky, and J. S. VanderGheynst, “Cultivation of black soldier fly larvae on almond byproducts: impacts of aeration and moisture on larvae growth and composition,” *J. Sci. Food Agric.*, vol. 98, no. 15, pp. 5893–5900, 2018, doi: 10.1002/jsfa.9252.

- [43] “Vereda Mochuelo Alto,” *Alcaldía Local de Ciudad Bolívar*.
<http://www.ciudadbolivar.gov.co/milocalidad/vereda-mochuelo-bajo> (accessed May 24, 2022).
- [44] L. Ferrer and A. del P. Pinzón, “Acercamiento a las afectaciones socioeconómicas en la comunidad del barrio El Mochuelo de la localidad Ciudad Bolívar frente al impacto ambiental del relleno sanitario Doña Juana,” 2009, doi: 10.1038/132817a0.
- [45] N. Castellanos, “ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y CONFLICTOS SOCIOAMBIENTALES: EL CASO DEL TERRITORIO MOCHUELO ALTO, CUENCA MEDIA DEL RIO TUNJUELO BOGOTÁ D.C,” 2021. [Online]. Available: http://books.google.com.co/books?id=iaL3AAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=intitle:Market+research+in+Practice+inauthor:hague&hl=&cd=1&source=gbs_api%0Apapers3://publication/uuid/4EEA28E9-41A0-4677-9426-7B552915D62F%0Ahttps://doi.org/10.1080/23311886.2019.16
- [46] J. S. Londoño Bustos, “Valoración participativa de los bienes y servicios ecosistémicos presentes en el relicto de bosque subxerofítico de la UPZ El Mochuelo Bajo, localidad de Ciudad Bolívar (Bogotá),” 2012. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10554/12460>
- [47] SINEAMBORE, “Compostando con la ruta fuerte.”
- [48] “[PODCAST] La Ruta Fuerte: donde todo sirve - Cerasetenta.” Accessed: Jun. 11, 2022. [Online]. Available: <https://cerosetenta.uniandes.edu.co/podcast-la-ruta-fuerte-donde-todo-sirve/>
- [49] SINEAMBORE and UAESP, “MANUAL DE OPERACIÓN DE PLANTA DE COMPOSTAJE MOCHUELO,” 2021.
- [50] “Análisis de situación en salud localidad de Ciudad Bolívar.”
- [51] S. Y. Chia *et al.*, “Threshold temperatures and thermal requirements of black soldier fly *Hermetia illucens*: Implications for mass production,” *PLoS One*, vol. 9, pp. 1–26, 2018.
- [52] A. Parodi *et al.*, “Bioconversion efficiencies, greenhouse gas and ammonia emissions during black soldier fly rearing – A mass balance approach,” *J. Clean. Prod.*, vol. 271, p. 122488, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122488.
- [53] B. Dortmans, S. Diener, B. Verstappen, and C. Zurbrügg, *Black Soldier Fly Biowaste Processing*. 2017.
- [54] W. Pang *et al.*, “The influence on carbon, nitrogen recycling, and greenhouse gas emissions under different C/N ratios by black soldier fly,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, no. 34, pp. 42767–42777, 2020, doi: 10.1007/s11356-020-09909-4.

- [55] G. Leni, A. Caligiani, and S. Sforza, “Killing method affects the browning and the quality of the protein fraction of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) prepupae: a metabolomics and proteomic insight,” *Food Res. Int.*, vol. 115, pp. 116–125, 2019, doi: 10.1016/j.foodres.2018.08.021.
- [56] W. A. Delgado, “¿Por qué se enrancian las grasas y aceites? Why do the Fat and Oils Graw,” *Fedepalma*, vol. 25, no. 42, pp. 35–43, 2004.
- [57] M. Bonelli *et al.*, “Black Soldier Fly Larvae Adapt to Different FoodSubstrates through Morphological and FunctionalResponses of the Midgut,” *Int. J. Mol. Sci.*, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ijms21144955>
- [58] R. Pérez-Pacheco *et al.*, “Growth of the Black Soldier Fly *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) on Organic-Waste Residues and Its Application as Supplementary Diet for Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* (Perciformes: Cichlidae),” *Insects*, vol. 13, no. 4, 2022, doi: 10.3390/insects13040326.
- [59] T. Sprangers *et al.*, “Nutritional composition of black soldier fly (,” *J. Sci. Food Agric.*, no. 97, pp. 2594–2600, 2017.
- [60] T. Klammsteiner *et al.*, “Impact of Processed Food (Canteen and Oil Wastes) on the Development of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae and Their Gut Microbiome Functions,” *Front. Microbiol.*, vol. 12, no. January, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3389/fmicb.2021.619112.
- [61] M. Y. Abduh, M. P. Perdana, M. A. Bara, L. W. Anggraeni, and R. E. Putra, “Effects of aeration rate and feed on growth, productivity and nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae,” *J. Asia. Pac. Entomol.*, vol. 25, no. 2, p. 101902, 2022, doi: 10.1016/j.aspen.2022.101902.
- [62] E. M. Nyakeri, H. J. O. Ogola, M. A. Ayieko, and F. A. Amimo, “Valorisation of organic waste material: Growth performance of wild black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on different organic wastes,” *J. Insects as Food Feed*, vol. 3, no. 3, pp. 193–202, 2017, doi: 10.3920/JIFF2017.0004.
- [63] C. Jucker, D. Erba, M. G. Leonardi, D. Lupi, and S. Savoldelli, “Assessment of Vegetable and Fruit Substrates as Potential Rearing Media for *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) Larvae,” *Environ. Entomol.*, vol. 46, no. 6, pp. 1415–1423, 2017, doi: 10.1093/ee/nvx154.
- [64] J. W. Diclaro II and P. E. Kaufman, “Black soldier fly *Hermetia illucens* Linnaeus (Insecta: Diptera: Stratiomyidae),” *Edis*, vol. 2009, no. 7, pp. 1–4, 2009, doi: 10.32473/edis-in830-2009.
- [65] K. B. Barragan-Fonseca, M. Dicke, and J. J. A. van Loon, “Nutritional value of the

- black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed - a review,” *J. Insects as Food Feed*, vol. 3, no. 2, pp. 105–120, 2017, doi: 10.3920/JIFF2016.0055.
- [66] A. Giannetto *et al.*, “*Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae and prepupae: Biomass production, fatty acid profile and expression of key genes involved in lipid metabolism,” *J. Biotechnol.*, vol. 307, pp. 44–54, 2020, doi: 10.1016/j.jbiotec.2019.10.015.
- [67] X. Liu *et al.*, “Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly _ Enhanced Reader.pdf.” 2017.
- [68] F. P. Gobbi, “Biología reproductiva y caracterización morfológica de los estadios larvarios de *Hermetia illucens* (L., 1758) (Diptera: Stratiomyidae). Bases para su producción masiva en Europa,” *Tesis Dr.*, p. 155, 2012.
- [69] D. Huyben, A. Vidaković, S. Werner Hallgren, and M. Langeland, “High-throughput sequencing of gut microbiota in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed larval and pre-pupae stages of black soldier fly (*Hermetia illucens*),” *Aquaculture*, vol. 500, no. October 2018, pp. 485–491, 2019, doi: 10.1016/j.aquaculture.2018.10.034.
- [70] C. Lalander, S. Diener, C. Zurbrügg, and B. Vinnerås, “Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*),” *J. Clean. Prod.*, vol. 208, pp. 211–219, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.017.
- [71] H. J. Van Der Fels-Klerx, L. Camenzuli, M. K. Van Der Lee, and D. G. A. B. Oonincx, “Uptake of cadmium, lead and arsenic by *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* from contaminated substrates,” *PLoS One*, vol. 11, no. 11, 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0166186.
- [72] M. Gold *et al.*, “Biowaste treatment with black soldier fly larvae: Increasing performance through the formulation of biowastes based on protein and carbohydrates,” *Waste Manag.*, vol. 102, pp. 319–329, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2019.10.036.
- [73] Z. Liu, M. Minor, P. C. H. Morel, and A. J. Najjar-Rodriguez, “Bioconversion of Three Organic Wastes by Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae,” *Environ. Entomol.*, vol. 47, no. 6, pp. 1609–1617, 2018, doi: 10.1093/ee/nvy141.

ANEXOS

ANEXO 1
PROTOCOLO PARA LA RECOLECCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE
RESIDUOS ORGÁNICOS

| | |
|-------------------------------------|--|
| DEPARTAMENTO: INGENIERÍAS | PROGRAMA: INGENIERÍA QUÍMICA |
| PROTOCOLO | Recolección y almacenamiento de residuos orgánicos |

INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

El aprovechamiento en el marco de servicios públicos domiciliarios es el conjunto de actividades dirigidas a efectuar la recolección, transporte y separación, cuando a ello haya lugar, de residuos sólidos que serán sometidos a procesos de reutilización, reciclaje o incineración con fines de generación de energía, compostaje, lombricultura o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales, sociales y/o económico en el marco de la Gestión Integral de los residuos sólidos (Decreto 1713 de 2002).

Es necesario entonces implementar un protocolo relacionado con la recolección, donde se contemplan actividades como la separación en la fuente de los residuos domiciliarios recordando que para el proceso de aprovechamiento tratado, es factible únicamente los de índole orgánica, los cuales se caracterizaron posteriormente, por lo cual este proceso es importante pues se presenta la necesidad de tener en cuenta un marco legal en Colombia, donde se dispongan las pautas correctas para cada una de las actividades.

La recolección corresponde a la recogida de los residuos acondicionados por el generador para encaminarlo por el medio del transporte adecuado, a una estación de transferencia, a una unidad de tratamiento o al lugar final de disposición (Rondón et al., 2016). Se debe tener en cuenta que la cantidad de residuo orgánico no supere los límites establecidos por las diferentes normativas, en donde es necesario definir un proceso de gestión integral de residuos según lo indica el PGIRS para la ciudad de Bogotá D.C.

Por otro lado, las principales alternativas disponibles de recipientes para depositar los residuos sólidos urbanos al paso del camino son los recipientes de almacenamiento, como las bolsas o sacos desechables y contenedores con ruedas (Rondón et al., 2016). En el caso de los residuos orgánicos es posible utilizar como almacenamiento en transporte bolsas que pueden estar asignadas según el código de color pertinente que permita identificar su contenido, sin tener que realizar una observación del contenido durante el trayecto.

El presente documento tomará como referencia la metodología presentada en la norma NTC 6029 Abonos o fertilizantes, muestreo en almacenes, en este definen el número de incrementos a considerar determinado por el tamaño de lote, como se ve indicado en la Tabla 1.

Tabla 1.

Unidad de muestra a tomar

| Tamaño de lote en número de toneladas | Unidad de muestra |
|---------------------------------------|-------------------|
| <1 | 1 |
| 1-8 | 3 |
| 9-15 | 3 |

Adaptado de: Norma NTC 6029 p.3.

EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y/O MATERIALES

Tener en cuenta las Normas de Seguridad. Incluir herramientas, reactivos, entre otros.

Los equipos e instrumentos a utilizar en la práctica son los siguientes:

- Calador cilíndrico
- Dispositivo de cortes perpendiculares
- Bolsas plásticas impermeables al vapor de agua y resellables
- Balanza
- Cajas

Se debe tener en cuenta como equipo de protección personal, guantes negros, tapabocas y bata de laboratorio.

MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

- Separación en la fuente: Realizar el proceso de separación en la fuente donde se encuentran los residuos domiciliarios, teniendo en cuenta que sólo los residuos orgánicos son los requeridos para el proceso de aprovechamiento, por esta razón se debe realizar una revisión previa para verificar que efectivamente no haya residuos de otro tipo como lo son papel, plástico y vidrios.

- Recolección de los residuos orgánicos y Almacenamiento: Para el proceso de recolección de muestras se establece en primer lugar que el total de unidades corresponde a 1 (Tabla 1), teniendo en cuenta una cantidad de incremento de 2000 gr, que se distribuye de la siguiente manera: 500 gr para el análisis

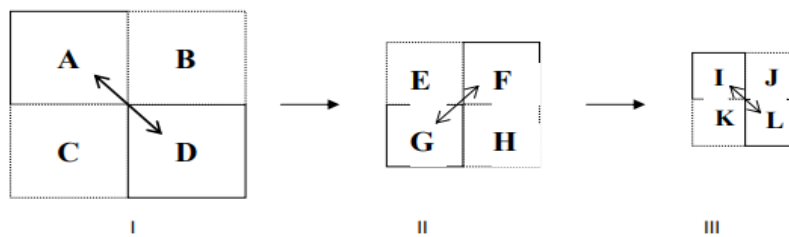
bromatológico, 300 gr para el análisis de material orgánico sólido y 1200 gr para el análisis de parámetros físicos.

- Utilizando un calador cilíndrico que posea una longitud mínima para penetrar la mitad del residuo orgánico a recolectar, se introduce de manera diagonal y luego dando vuelta a este se retira la muestra, este proceso se debe repetir hasta completar la cantidad mínima del incremento. Posteriormente, se reúnen las muestras en una bolsa o recipiente impermeable al vapor de agua a la mayor brevedad posible, en donde se mezcla perfectamente el contenido para obtener una muestra agregada homogénea.

- Para obtener cada una de las muestras reducidas requeridas se realiza un proceso de muestreo por cuarteo.

- Método de cuarteo: El método de cuarteo consiste en mezclar el material a analizar para luego apilarlo en forma de cono, luego de esto se comprime y se divide en cuatro (4) partes iguales en forma de cruz, se retiran dos cuartos opuestos y los dos restantes que forman una nueva muestra se vuelven a mezclar con el objetivo de repetir el proceso varias veces hasta obtener la cantidad de muestra deseada.

- Figura 1. Preparación de muestras por cuarteo.



- Tomado de RIVERA, Luisa y GARCIA, Silvana. Actualización del manual del laboratorio de análisis de alimentos del programa de tecnología química de la universidad tecnológica de Pereira. Trabajo de grado tecnóloga química. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de tecnología, 2010. 29 p.

- Al ser residuos de origen urbano, las muestras se deben tomar al azar de diferentes sectores del barrio, teniendo en cuenta que se debe incluir tanto el sector doméstico como comercial de la zona motivo de estudio con el objetivo de que la muestra sea homogénea.

- Finalmente, la muestra reducida se coloca en recipientes que se puedan sellar herméticamente y se les asigna un rótulo con información pertinente como el número de identificación de la muestra y nombre de operadores que tomaron la muestra, este rótulo debe ser protegido al contacto con la humedad.

- Transporte de los residuos orgánicos: Para el transporte se usarán cajas para contener las muestras bien selladas que eviten cualquier eventualidad ante impacto o rasgaduras, se debe tener en cuenta que los vehículos deberán contar con cubierta que reduzca el contacto del residuo con la lluvia y el viento y se evite el esparcimiento del mismo. Además, el vehículo deberá estar adecuado para la cantidad de residuo recolectado que será llevado al laboratorio. Es importante aclarar que este procedimiento aplica para los residuos orgánicos utilizados para el proceso de biodegradación y la biomasa obtenida al final (sin embargo, esta debe tener en cuenta el etiquetado y el empaque que solicite el laboratorio donde se realicen los análisis químicos).
- Normas a tener en cuenta para el muestreo: Las normas que se tienen en cuenta para la realización del muestreo son: NTC 4113-2 (GESTION AMBIENTAL. CALIDAD DE SUELO. MUESTREO. GUÍA SOBRE TÉCNICAS DE MUESTREO), 4113-4 (CALIDAD DE SUELO. MUESTREO. PARTE 4. GUIA SOBRE EL PROCEDIMIENTO PARA LA INVESTIGACIÓN DE SITIOS NATURALES, SEMI-NATURALES Y CULTIVADOS) y NTC 6029 (ABONOS O FERTILIZANTES. MUESTREO EN ALMACENES); en ellas se describe como debe ser el paso a paso de recolección según las técnicas de aplicabilidad de excavación del terreno perforación y técnicas de muestreo. En ello se debe tener en cuenta que sería una muestra disturbada de excavación manual.

REFERENCIAS

Decreto 1713 de 2002. Por medio del cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión integral de Residuos Sólidos, 6 de agosto de 2002.

Mesa, P. R., & Ram, G. E. (2008). Guía para el Manejo Integral de Residuos. En enero de 2008.
[http://itagui.aredigital.gov.co/institucional/Documents/Guía para el Manejo Integral de Residuos-Subsector de calzado, cuero, plástico y sus manufacturas.pdf](http://itagui.aredigital.gov.co/institucional/Documents/Guía%20para%20el%20Manejo%20Integral%20de%20Residuos-Subsector%20de%20calzado,%20cuero,%20plástico%20y%20sus%20manufacturas.pdf)

“NTC - 40: Abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Etiquetado”, ICONTEC, Vol. II, Colombia, pp 1 - 60, 2017.

“NTC - 6029: Abonos o fertilizantes Muestreo en almacenes. Etiquetado”, ICONTEC, Colombia, pp 1 - 14, 2013.

Rondón, E., Szantó, M., Pacheco, J., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios. Manuales de La CEPAL, 209.
<https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40407>

Resolución 2184 del 2019. Por medio del cual se modifica la resolución 668 del 2016 sobre uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones. 26 de diciembre de 2019.

E. Alayón. “Guía para la caracterización y cuantificación de residuos sólidos”. Inventum, vol. 15, no. 29,

pp. 76-94. doi: 10.26620/uniminuto.inventum. 15.29.2020.76-94

ANEXO 2

PROTOCOLO PARA LOS ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICOS DE LOS BIORRESIDUOS

| | |
|----------------------------------|---|
| DEPARTAMENTO: INGENIERÍAS | PROGRAMA: INGENIERÍA QUÍMICA |
| PROTOCOLO | Análisis de parámetros físicos para biorresiduos. |

INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

El aprovechamiento en el marco de servicios públicos domiciliarios es el conjunto de actividades dirigidas a efectuar la recolección, transporte y separación, cuando a ello haya lugar, de residuos sólidos que serán sometidos a procesos de reutilización, reciclaje o incineración con fines de generación de energía, compostaje, lombricultura o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales, sociales y/o económico en el marco de la Gestión Integral de los residuos sólidos (Decreto 1713 de 2002).

Es necesario entonces implementar un protocolo relacionado con el análisis de parámetros físicos y químicos de los residuos orgánicos, con el fin de tener un factor de comparación al momento de obtener una biomasa residual producto de la biodegradación con la larva *Hermetia Illucens*. El presente documento tiene como referencia la metodología presentada en la norma *NTC 5167*, Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abono o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo, en donde se encuentran los parámetros a garantizar para enmiendas o acondicionadores orgánicos húmicos sólidos.

Para la caracterización de residuos cocidos y cárnicos se siguió los pasos estipulados por *la AOAC 964.22* y *la AOAC 920.39C* para la determinación del porcentaje de grasa de los 4 tipos de biorresiduos analizados.

Dentro del protocolo se mencionan los pasos a seguir para poder determinar factores como la humedad, el % de cenizas (pérdida de volatilización), pH, densidad y % de grasa.

EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y/O MATERIALES

Tener en cuenta las Normas de Seguridad. Incluir herramientas, reactivos, entre otros. Los equipos e instrumentos a utilizar en la práctica son los siguientes:

- Estufa de secado.
- Molino.
- Tamiz No. 35 ASTM (0,5 mm).
- Recipientes para secado en estufa de aproximadamente 400 ml.
- Balanza (con precisión de 0,01 g).
- Balanza analítica.
- Desecador.
- Mufla.
- Crisoles de porcelana.
- Probeta de vidrio de 50 cm³ de capacidad.
- Embudo.
- Soporte universal.
- Pinzas para soporte o aro de hierro.
- Potenciómetro.
- Espátula de madera.
- Recipiente plástico.

Se debe tener en cuenta como equipo de protección personal, guantes, tapabocas, gafas de seguridad y bata de laboratorio.

MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS:

Humedad:

- Se pesa el recipiente vacío en el cual se cuantificará la propiedad con una balanza con alto grado de precisión.
- Se pesará en el recipiente una cantidad de muestra de 400 g de tal manera que se puedan recolectar aproximadamente 300 g de material seco.
- Luego se lleva el recipiente a una estufa de secado a una temperatura de 70°C durante 24 horas.
- En un desecador esperar hasta peso constante, en este momento es cuando se pesará nuevamente.
- Proceso de molienda y tamizado a la muestra que posteriormente se debe empacar en recipientes rotulados

para la determinación de otros parámetros.

Ecuación 1. Porcentaje de humedad.

$$\%Humedad = \frac{(\text{peso muestra húmeda} - \text{peso muestra seca})}{(\text{peso muestra húmeda})} * 100$$

Tabla 1. Toma de datos para la prueba de humedad.

| | |
|------------------------------------|--|
| Peso recipiente vacío | |
| Peso posterior al desecador | |

Nota: En el presente no se tiene en cuenta la toma de muestra del peso de la muestra, debido a que es una variable supuesta por los operadores. Elaboración propia.

% Cenizas (pérdida de volatilización):

- Se pesan 5 g del material preparado dispuesto en un crisol de porcelana con ayuda de una balanza analítica.
- Posteriormente se colocará el crisol en una mufla y este se debe dejar en un período de tiempo de 4 horas a una temperatura de 650°C.
- Después de transcurrido el tiempo, la muestra se deberá enfriar y pasar a un desecador.
- Se realizará el registro del peso final.

Ecuación 2. Porcentaje de cenizas.

$$\%Cenizas = \left(\frac{\text{peso final de la muestra}}{\text{peso inicial de la muestra}} * 100 \right) \left(\frac{100 - \%Humedad}{100} \right)$$

$$\%Pérdidas \text{ por volatilización} = 100 - \%Cenizas$$

Tabla 2. Toma de datos para la prueba de % Cenizas.

| | |
|---------------------------------|--|
| Peso final de la muestra | |
| | |

Nota: El peso inicial de la muestra a los 5 g, estipulados para el proceso, la humedad corresponde a la determinada previamente en el laboratorio. Elaboración propia.

pH:

- Se pesan aproximadamente 50 g de material preparado colocándolo en un recipiente de plástico.
- Posteriormente se agregan pequeños volúmenes de agua destilada o desmineralizada.
- Luego se agita constantemente con una espátula de madera hasta formar una masa y si es necesario golpear el recipiente suavemente para asentar la muestra.
- Se deberá adicionar agua hasta alcanzar un punto de equilibrio en donde se deberá reflejar un brillo metálico sobre la superficie. Importante: Es necesario calibrar el potenciómetro con soluciones reguladoras de pH 7,0 y pH 4,0.
- Finalmente se introduce el electrodo de vidrio en la pasta saturada y se registra la lectura de la muestra estudiada.

Tabla 3. Toma de datos para el pH.

| | |
|------------------------------|--|
| Lectura del electrodo | |
|------------------------------|--|

Nota: Elaboración propia.

Densidad:

- Pesar previamente una probeta totalmente seca y limpia en una balanza de precisión.
- Con la ayuda de un embudo se dejará caer una cantidad de material preparada suficiente para obtener una lectura aproximada de 30cm³ y se registra el volumen ocupado por la muestra.
- Posterior a esto se determina el peso de la probeta con el material teniendo en cuenta que el proceso se realizará por triplicado y la densidad será el promedio de las tres recolecciones de datos.

Ecuación 3. Densidad real.

$$\text{Densidad real (base seca)} = \left(\frac{\text{peso de probeta con material seco} - \text{peso de la probeta vacía}}{\text{volumen ocupado por el material de la probeta}} \right)$$

Tabla 4. *Tabla de datos para la densidad.*

| | Primera prueba | Segunda prueba | Tercera prueba |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Peso probeta vacía | | | |
| Peso probeta con material seco | | | |

Nota: Se realiza la muestra por triplicado, para realizar el promedio de los valores recolectados en el electrodo, el cual corresponderá al valor final. Elaboración propia.

% de Grasa

La cantidad de la muestra (m_0) a analizar estará determinada por la Tabla 5.

Tabla 5. *Tamaño de muestra.*

| Contenido de grasa cruda esperado % | Tamaño de la muestra (g) |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Menor de 2 | 5 |
| 5 | 2-4 |
| 10 | 1-2 |
| Mayor que 20 | 1 |

Nota: El proceso se realizó por duplicado. Elaboración propia.

- Preparar una solución de 4 N de ácido clorhídrico, añadir la muestra a un Erlenmeyer con la solución, cubrir y calentar durante una hora con agitación; al pasar la hora agregar 150 ml de agua caliente.
- Colocar un papel filtro en un embudo de vidrio y humedecerlo, filtrar el contenido caliente proveniente del Erlenmeyer y lavar 3 veces con agua caliente hasta que el agua de lavado no cambie su color del papel de tornasol azul.
- Secar el papel filtro durante 1 hora en la mufla. Dejar enfriar en el desecador. Simultáneamente secar durante 1 hora el matraz a usar y luego registrar su peso (m_1).
- Introducir el papel filtro en un dedal.
- Agregar el solvente en el matraz de extracción Realizar el proceso de extracción hasta que se completen 30 sifones.
- Secar el matraz en la mufla durante 1 hora. Dejar enfriar y luego pesar (m_2).

Ecuación 3.

$$\%Grasa = (m_2 - m_1) * \frac{100}{m_0}$$

REFERENCIAS

Decreto 1713 de 2002. Por medio del cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión integral de Residuos Sólidos, 6 de agosto de 2002.

*Mesa, P. R., & Ram, G. E. (2008). Guía para el Manejo Integral de Residuos. En enero de 2008.
[http://itagui.aredigital.gov.co/institucional/Documents/Guía para el Manejo Integral de Residuos-Subsector de calzado, cuero, plastico y sus manufacturas.pdf](http://itagui.aredigital.gov.co/institucional/Documents/Guía%20para%20el%20Manejo%20Integral%20de%20Residuos-Subsector%20de%20calzado,%20cuero,%20plastico%20y%20sus%20manufacturas.pdf)*

“NTC - 40: Abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Etiquetado”, ICONTEC, Vol. II, Colombia, pp 1 - 60, 2017.

“NTC - 5167: Productos para la industria agrícolas. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo”, ICONTEC, Vol. II, Colombia, pp 1 - 60, 2011.

ANEXO 3

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE RESIDUOS FRESCOS



INFORME DE RESULTADOS

ÁREA DE ANÁLISIS DE MATERIALES ORGÁNICOS

Registro ICA LB0000342021

Control de calidad de fertilizantes, acondicionadores de suelo y reguladores fisiológicos
Vigencia 17 de Nov. de 2031

| | | | |
|------------|---------------|-------------------|----------------|
| Informe N° | 15041-V1-2022 | N° de Laboratorio | AMO-00756-2022 |
|------------|---------------|-------------------|----------------|

| Información del Cliente | | | |
|-------------------------|-------------------------------|----------------|--|
| Remitente | DIANA MARCELA CUESTA PARRA | Responsable | SRA. VALENTINA GUZMAN MUÑETON |
| Propietario | SRA. VALENTINA GUZMAN MUÑETON | Email contacto | valentina.guzman@estudiantes.uamericana.edu.co |
| Fecha Ingreso | 28-04-2022 | Fecha Emisión | 11-05-2022 |

| Información de la Muestra Suministrada por el cliente | | | |
|---|-----------------|-----------------------|----------|
| Identificación Suministrada | NINGUNA | Lote / Bloque | N.S. |
| Fuente del Material / | NO ESPECIFICADO | Contrato N° | |
| Descripción Física | SÓLIDO CAFÉ | Condiciones recepción | CONFORME |

| CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS SÓLIDOS | | | | |
|---|-------------------|------------|----------------|--|
| Variable | Expresión / Sigla | Resultados | Unidades | Extractante/Técnica/Documento Normativo |
| Humedad | N.A. | 77.1 | % | 70 °C / Gravimétrico / NTC 5167 |
| pH | pH | 5.83 | Unidades de pH | Pasta de saturación / Potenciométrico / NTC 5167 |
| Conductividad Eléctrica | CE | 17.3 | dS/m | Pasta de saturación / Conductimétrico / NTC 5167 |
| Retención de Humedad | Ret. Hum. | 49.9 | % | Pasta de saturación / Gravimétrico / NTC 5167 |
| Cenizas | N.A. | 5.21 | % | 700 °C / Gravimétrico / NTC 5167 |
| Perdidas por Volatilización | N.A. | 17.7 | % | 700 °C / Gravimétrico / NTC 5167 |
| Capacidad de Intercambio Catiónico | CIC | 15.7 | meq/100g | Acetato de amonio / Volumétrico / NTC 5167 |
| Densidad Real (En Base Seca) | N.A. | 0.477 | g/cm3 | Directo / Gravimétrico / NTC 5167 |
| Carbono Orgánico Oxidable Total | COOx | 7.13 | % | Sln. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167 |
| Relación Carbono / Nitrógeno | C/N | 17 | Adimensional | Relación matemática |

| CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL | | | | |
|--|-------------------------------|-------|-------|--|
| Nitrógeno Total | NT | 0.408 | % | Sumatoria de Especies de Nitrógeno requeridas por el cliente |
| Nitrógeno Orgánico | N Orgánico | 0.408 | % | Micro-Kjeldahl / Volumétrico / NTC 370 |
| Fósforo Total | P ₂ O ₅ | 0.178 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 234 |
| Potasio Total | K ₂ O | 0.640 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / PlantAnalysisProcedures |
| Calcio Total | CaO | 2.78 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / PlantAnalysisProcedures |
| Magnesio Total | MgO | 0.114 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / PlantAnalysisProcedures |
| Azufre Total | S | 0.053 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 1154 |
| Hierro Total | Fe | 0.101 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / PlantAnalysisProcedures |
| Manganeso Total | Mn | 17.5 | mg/kg | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / PlantAnalysisProcedures |

| CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL | | | | |
|--|------------------|--|-------|--|
| Cobre Total | Cu | 4.40 | mg/kg | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / PlantAnalysisProcedures |
| Zinc Total | Zn | 15.7 | mg/kg | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / PlantAnalysisProcedures |
| Boro Total | B | 9.61 | mg/kg | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 1860 |
| Sodio Total | Na | 0.036 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EAA / PlantAnalysisProcedures |
| Silicio (Soluble en HF) | SiO ₂ | 1.37 | % | MVH HF / EAA / NTC 5167 |
| Residuo Insoluble en Ácido | N.A. | 1.70 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Gravimétrico / NTC 5167 |
| Observaciones a los resultados: | | Convenciones: | | |
| NINGUNO | | N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sin. Solución / N.S. No Suministrada / N.D.No Detectado / MVH Mineralización Vía Húmeda / M.I. Muestra Insuficiente EAA Espectroscopía de Absorción Atómica / EEA Espectroscopía de Emisión Atómica / ICP-OES Espectroscopía de Emisión Óptica de plasma acoplado inductivamente / EAM Extracción Asistida con Microondas | | |

---- Fin del Reporte de Resultados Analíticos ----

Autorizado por:



Nicolas Preciado

Director de investigación y desarrollo - Químico - PQ
06085

Revisado por:



Paola Díaz
Coordinador de Area-Química-PQ 3257

---- Fin del Informe ----

ANEXO 4
RESULTADOS DEL ANÁLISIS BROMATOLÓGICO ESPECIAL DE RESIDUOS
FRESCOS



INFORME DE RESULTADOS
 ÁREA DE ANÁLISIS BROMATOLÓGICOS



| | | | |
|-------------------|---------------|--------------------------|----------------|
| Informe N° | 15420-V1-2022 | N° de Laboratorio | ABR-00300-2022 |
|-------------------|---------------|--------------------------|----------------|

| Información del Cliente | | | |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Remitente | DIANA MARCELA CUESTA PARRA | Responsable | SRA. VALENTINA GUZMAN MUÑETON |
| Propietario | SRA. VALENTINA GUZMAN MUÑETON | Email contacto | valentina.guzman@estudiantes.uamerica.edu.co |
| Fecha Ingreso | 28-04-2022 | Fecha Emisión | 13-05-2022 |

| Información de la Muestra enviada por el cliente | | | |
|--|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Cultivo / Variedad | NO_ESPECIFICADO - NO ESPECIFICADO | Lote / Bloque | N.S. |
| Municipio/Departamento/Finca | No Especificado | N.S. | Contrato N° |
| Información adicional | NINGUNA | | Condiciones recepción CONFORME |

| ANÁLISIS BROMATOLÓGICO ESPECIAL* | | | | |
|----------------------------------|-------------------|------------|----------|-------------------------------------|
| Descripción Física de la Muestra | | LODO | | |
| Variable | Expresión / Sigla | Resultados | Unidades | Extractante/Técnica/Referencia |
| Humedad | N.A. | 77.1 | % | 70 °C / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Materia Seca | N.A. | 22.9 | % | Cálculo |
| Cenizas | Fracción Mineral | 20.9 | % | 700 °C / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Pérdidas por Volatilización | N.A. | 79.1 | % | Cálculo |

| CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA | | | | |
|---|------------|------|---|---|
| Extracto Etéreo | Grasa | 1.63 | % | Éter / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Fibra Cruda | FC | 17.9 | % | Mezcla ácida / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Fibra Detergente Ácida | FDA | 27.3 | % | Detergente Ácido / Gravimétrico / ICA 1985 |
| Fibra Detergente Neutra | FDN | 37.2 | % | Detergente Neutro / Gravimétrico / ICA 1985 |
| Nitrógeno Orgánico | N Orgánico | 1.83 | % | Mezcla Kjeldahl / Volumétrico / Bernal 1994 |
| Proteína Cruda | PC | 11.4 | % | Mezcla Kjeldahl / Volumétrico / Bernal 1994 |
| Extracto No Nitrogenado | ENN | 48.2 | % | Cálculo |

| CONTENIDO DE NUTRIENTES | | | | |
|-------------------------|----|-------|---|--|
| Fósforo | P | 0.323 | % | EAM HNO3:H2O2/ ICP-OES/ Método interno |
| Calcio | Ca | 6.23 | % | EAM HNO3:H2O2/ ICP-OES/ Método interno |

| Observaciones a los resultados: | Convenciones: |
|---------------------------------|---|
| NINGUNO | N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sin. Solución / N.S. No Suministrada / N.D. No Detectado / MVH Mineralización Vía Húmeda / M.I. Muestra Insuficiente EAA Espectroscopía de Absorción Atómica / EAA Espectroscopía de Emisión Atómica |

---- Fin del Reporte de Resultados Analíticos ----

Autorizado por:

Revisado por:

ANEXO 5

RESULTADOS DEL ANÁLISIS BORMATOLOGICO ESPECIAL PARA LARVAS INSTAR 5



INFORME DE RESULTADOS

ÁREA DE ANÁLISIS BROMATOLÓGICOS



| | | | |
|-------------------|---------------|--------------------------|----------------|
| Informe N° | 21742-V1-2022 | N° de Laboratorio | ABR-00390-2022 |
|-------------------|---------------|--------------------------|----------------|

| Información del Cliente | | | |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Remitente | VALENTINA GUZMAN MUÑETON | Responsable | SRA. VALENTINA GUZMAN MUÑETON |
| Propietario | SRA. VALENTINA GUZMAN MUÑETON | Email contacto | valentina.guzman@estudiantes.uamerica.edu.co |
| Fecha Ingreso | 30-06-2022 | Fecha Emisión | 15-07-2022 |

| Información de la Muestra enviada por el cliente | | | |
|--|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Cultivo / Variedad | NO_ESPECIFICADO - NO ESPECIFICADO | Lote / Bloque | HARINA DE LARVAS INSTAR 5 |
| Municipio/Departamento/Finca | BOGOTA, D.C. - BOGOTA N.S. | Contrato N° | |
| Información adicional | NINGUNA | Condiciones recepción | CONFORME |

| ANÁLISIS BROMATOLÓGICO ESPECIAL* | | | | |
|----------------------------------|------------------|-------------|----------|-------------------------------------|
| Descripción Física de la Muestra | | SÓLIDO CAFÉ | | |
| Variable | Expresión /Sigla | Resultados | Unidades | Extractante/Técnica/Referencia |
| Humedad | N.A. | 2.55 | % | 70 °C / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Materia Seca | N.A. | 97.4 | % | Cálculo |
| Cenizas | Fracción Mineral | 25.2 | % | 700 °C / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Pérdidas por Volatilización | N.A. | 74.8 | % | Cálculo |

| CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA | | | | |
|---|------------------|------------|----------|---|
| Variable | Expresión /Sigla | Resultados | Unidades | Extractante/Técnica/Referencia |
| Extracto Etéreo | Grasa | 3.46 | % | Éter / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Fibra Cruda | FC | 12.2 | % | Mezcla ácida / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Fibra Detergente Ácida | FDA | 47.4 | % | Detergente Ácido / Gravimétrico / ICA 1985 |
| Fibra Detergente Neutra | FDN | 51.4 | % | Detergente Neutro / Gravimétrico / ICA 1985 |
| Nitrógeno Orgánico | N Orgánico | 6.92 | % | Mezcla Kjeldahl / Volumétrico / Bernal 1994 |
| Proteína Cruda | PC | 43.2 | % | Mezcla Kjeldahl / Volumétrico / Bernal 1994 |
| Extracto No Nitrogenado | ENN | 15.9 | % | Cálculo |

| CONTENIDO DE NUTRIENTES | | | | |
|-------------------------|------------------|------------|----------|--|
| Variable | Expresión /Sigla | Resultados | Unidades | Extractante/Técnica/Referencia |
| Fósforo | P | 1.41 | % | EAM HNO3:H2O2/ ICP-OES/ Método interno |
| Calcio | Ca | 9.75 | % | EAM HNO3:H2O2/ ICP-OES/ Método interno |

| Observaciones a los resultados: | Convenciones: |
|--|---|
| El parámetro Extracto Etéreo fue verificado. | N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sin. Solución / N.S. No Suministrada / N.D. No Detectado / MVH Mineralización Vía Húmeda / M.I. Muestra Insuficiente EAA Espectroscopía de Absorción Atómica / EAA Espectroscopía de Emisión Atómica |

---- Fin del Reporte de Resultados Analíticos ----

Autorizado por:

Revisado por:

ANEXO 6

RESULTADOS DEL ANÁLISIS BORMATOLÓGICO ESPECIAL PARA PREPUPA (INSTAR 6)



INFORME DE RESULTADOS
ÁREA DE ANÁLISIS BROMATOLÓGICOS



| | | | |
|-------------------|---------------|--------------------------|----------------|
| Informe N° | 21741-V1-2022 | N° de Laboratorio | ABR-00391-2022 |
|-------------------|---------------|--------------------------|----------------|

| Información del Cliente | | | |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| Remitente | VALENTINA GUZMAN MUÑETON | Responsable | SRA. VALENTINA GUZMAN MUÑETON |
| Propietario | SRA. VALENTINA GUZMAN MUÑETON | Email contacto | valentina.guzman@estudiantes.uamerica.edu.co |
| Fecha Ingreso | 30-06-2022 | Fecha Emisión | 15-07-2022 |

| Información de la Muestra enviada por el cliente | | | |
|--|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Cultivo / Variedad | NO_ESPECIFICADO - NO ESPECIFICADO | Lote / Bloque | HARINA DE LARVAS INSTAR 6 |
| Municipio/Departamento/Finca | BOGOTA, D.C. - BOGOTA | N.S. | Contrato N° |
| Información adicional | NINGUNA | | Condiciones recepción CONFORME |

ANÁLISIS BROMATOLÓGICO ESPECIAL*

| Descripción Física de la Muestra | | SÓLIDO CAFÉ | | |
|----------------------------------|-------------------|-------------|----------|-------------------------------------|
| Variable | Expresión / Sigla | Resultados | Unidades | Extractante/Técnica/Referencia |
| Humedad | N.A. | 2.56 | % | 70 °C / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Materia Seca | N.A. | 97.4 | % | Cálculo |
| Cenizas | Fracción Mineral | 12.3 | % | 700 °C / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Pérdidas por Volatilización | N.A. | 87.7 | % | Cálculo |

| CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA | | | | |
|---|-------------------|------------|----------|---|
| Extracto | Expresión / Sigla | Resultados | Unidades | Extractante/Técnica/Referencia |
| Extracto Etéreo | Grasa | 30.9 | % | Éter / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Fibra Cruda | FC | 10.8 | % | Mezcla ácida / Gravimétrico / Bernal 1994 |
| Fibra Detergente Ácida | FDA | 34.4 | % | Detergente Ácido / Gravimétrico / ICA 1985 |
| Fibra Detergente Neutra | FDN | 40.7 | % | Detergente Neutro / Gravimétrico / ICA 1985 |
| Nitrógeno Orgánico | N Orgánico | 6.37 | % | Mezcla Kjeldahl / Volumétrico / Bernal 1994 |
| Proteína Cruda | PC | 39.8 | % | Mezcla Kjeldahl / Volumétrico / Bernal 1994 |
| Extracto No Nitrogenado | ENN | 6.20 | % | Cálculo |

| CONTENIDO DE NUTRIENTES | | | | |
|-------------------------|-------------------|------------|----------|--|
| Nutriente | Expresión / Sigla | Resultados | Unidades | Método |
| Fósforo | P | 0.585 | % | EAM HNO3:H2O2/ ICP-OES/ Método interno |
| Calcio | Ca | 5.50 | % | EAM HNO3:H2O2/ ICP-OES/ Método interno |

| Observaciones a los resultados: | Convenciones: |
|--|---|
| El parámetro Extracto Etéreo fue verificado. | N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sin. Solución / N.S. No Suministrada / N.D. No Detectado / MVH Mineralización Vía Húmeda / M.I. Muestra Insuficiente EAA Espectroscopia de Absorción Atómica / EAA Espectroscopia de Emisión Atómica |

---- Fin del Reporte de Resultados Analíticos ----

Autorizado por:

Revisado por:

ANEXO 7

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DEL FRASS DE RESIDUOS FRESCOS



INFORME DE RESULTADOS

Registro ICA LB0000342021

Control de calidad de fertilizantes,
abonadores de suelo y/o reguladores
fisiológicos.
Vigencia 17 de Nov. de 2031

ÁREA DE ANÁLISIS DE MATERIALES ORGÁNICOS

| | | | |
|-------------------|---------------|--------------------------|----------------|
| Informe N° | 20520-V1-2022 | N° de Laboratorio | AMO-01072-2022 |
|-------------------|---------------|--------------------------|----------------|

| Información del Cliente | | | |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Remitente | NICOLAS MACIAS GIRALDO | Responsable | SR. NICOLAS MACIAS GIRALDO |
| Propietario | SR. NICOLAS MACIAS GIRALDO | Email contacto | nicolasmg.0502@hotmail.com |
| Fecha Ingreso | 14-06-2022 | Fecha Emisión | 05-07-2022 |

| Información de la Muestra Suministrada por el cliente | | | |
|---|--------------------------|------------------------------|----------|
| Identificación Suministrada | ACONDICIONADOR DE SUELOS | Lote / Bloque | N.S. |
| Fuente del Material / | NO ESPECIFICADO | Contrato N° | |
| Descripción Física | SÓLIDO CAFÉ | Condiciones recepción | CONFORME |

CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS SÓLIDOS

| Variable | Expresión / Sigla | Resultados | Unidades | Extractante/Técnica/Documento Normativo |
|--|-------------------|------------|-------------------|--|
| Humedad | N.A. | 27.5 | % | 40 y 70 °C / Gravimetría / NTC 5167 (r) |
| pH en pasta de saturación | pH | 8.71 | Unidades de pH | Pasta de saturación / Potenciométrico / NTC 5167 (r) |
| Conductividad Eléctrica | CE | 6.34 | dS/m | Pasta de saturación / Conductimétrico / NTC 5167 (r) |
| Retención de Humedad | Ret. Hum. | 171 | % | Pasta de saturación / Gravimétrico / NTC 5167 (r) |
| Cenizas | N.A. | 21.4 | % | 700 °C / Gravimétrico / NTC 5167 (r) |
| Perdidas por Volatilización | N.A. | 51.1 | % | 700 °C / Gravimétrico / NTC 5167 (r) |
| Capacidad de Intercambio Catiónico - CIC | CIC | 58.6 | meq/100g | Acetato de amonio / Volumétrico / NTC 5167 (r) |
| Densidad | N.A. | 0.558 | g/cm ³ | Directo / Gravimétrico / NTC 5167 (r) |
| Carbono Orgánico Oxidable Total | COOx | 17.8 | % | Sln. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167 (r) |
| Relación Carbono / Nitrógeno | C/N | 12 | Adimensional | Relación matemática |

CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL

| | | | | |
|--------------------|-------------------------------|-------|-------|--|
| Nitrógeno Total | NT | 1.46 | % | Sumatoria de Especies de Nitrógeno requeridas por el cliente |
| Nitrógeno Orgánico | N Orgánico | 1.46 | % | Micro-Kjeldahl / Volumetría / NTC 5167-NTC 370 (r) |
| Fósforo total | P ₂ O ₅ | 0.455 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Colorimetría / NTC 5167-NTC 234 (r) |
| Potasio Total | K ₂ O | 2.42 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EEA / NTC 5167 - NTC 202 (r) |
| Calcio total | CaO | 6.72 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EEA / NTC 5167 - EPA7000B (r) |
| Magnesio total | MgO | 0.363 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EEA / NTC 5167 - EPA7000B (r) |
| Azufre total | S | 0.201 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / Turbidimetría / NTC 5167 - IGAC(1982) -NTC 1154 (r) |
| Hierro total | Fe | 0.189 | % | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EEA / NTC 5167 - EPA7000B (r) |
| Manganeso total | Mn | 60.5 | mg/kg | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EEA / NTC 5167 - EPA7000B (r) |
| Cobre Total | Cu | 25.7 | mg/kg | MVH Ácido Nítrico:Ácido Perclórico / EEA / NTC 5167 - EPA7000B (r) |

ANEXO 8

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar análisis proximales para todos los sustratos empleados en el proceso de degradación de biorresiduos tanto al inicio como al final de proceso con el objetivo de evidenciar la variación de los nutrientes y su influencia en el desarrollo larval.

Se recomienda para futuras investigaciones realizar un énfasis en cuanto a los gases emitidos durante el proceso de degradación.

Si se desea emplear sustratos relacionados con residuos cárnicos se recomienda implementar en la dieta un mayor porcentaje de proteína para evitar un exceso de grasa dentro del sustrato que afecte de manera significativa el desarrollo larval y la eficiencia del proceso.

Se recomienda usar instrumentos de medición más exactos, en este caso un calibrador pie de rey digital para disminuir los posibles errores humanos.

Se recomienda implementar un sistema de control dentro del reactor más estable que permita realizar la toma de datos durante todo el periodo que dure el proceso de biodegradación.