



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Unidad Azcapotzalco

División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Proyecto de Integración

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Evaluación del tratamiento de residuos de café en grano, generados en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, mediante lombricomposteo

Modalidad: Proyecto de investigación

Trimestre 24-P

Presenta:

Torres Cerón Alexandra

Asesoras:

Mtra. Santana Cruz Alejandra

Dra. Cruz Salas Arely Areanely

Fecha: 11 de octubre de 2024

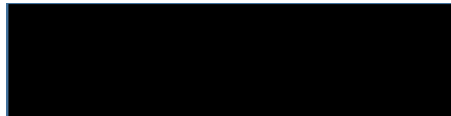
Declaratoria

Yo, Alejandra Santana Cruz, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



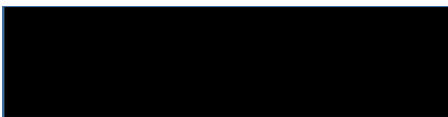
Asesora: M. en C. Alejandra Santana Cruz

Yo, Arely Areanely Cruz Salas, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Co-asesora: Dra. Arely Areanely Cruz Salas

Yo, Alexandra Torres Cerón, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de la UAM Azcapotzalco.



Alumna: Alexandra Torres Cerón

Resumen

El café es el tercer producto más consumido en México, con un crecimiento anual constante. En 2020, el consumo fue de 230,000 toneladas, y en 2023 subió a 311,000 toneladas. Además, México es el décimo segundo productor de café en el mundo (Bahena, 2023). Este aumento en el consumo genera una preocupación ambiental, debido a la gestión inadecuada de los residuos, que incluyen tanto residuos orgánicos (granos de café, el mucilago, la pulpa, entre otros), como residuos inorgánicos provenientes del empaquetado, la mayoría de los cuales no son recuperables o reciclables.

El presente estudio analizó la generación y el tratamiento de residuos de café de grano generados en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, mediante el lombricompostaje como una alternativa viable para su manejo. Se montaron tres tratamientos con diferentes proporciones de residuos de café y composta madura: tratamiento 1, 50 % composta madura y 50 % residuos de café; tratamiento 2, 70 % composta madura y 30 % residuos de café; tratamiento 3, 90 % composta madura y 10 % residuos de café; además de un control (100 % composta madura), todos por triplicado. Esto tuvo el objetivo de evaluar cuál de los tratamientos resultaba ser el más efectivo y viable para aprovechar los residuos de café de grano y así producir una lombricomposta rica en nutrientes, útil como fertilizante o mejorador de suelo dentro de la misma universidad.

Para cumplir con los objetivos de este proyecto primero se realizó un cuestionario el cual fue aplicado a la encargada de la cafetería gourmet (Silvia Lemus), con el fin de recabar información importante sobre la generación y el manejo de los residuos de café de grano. Por otro lado, se recolectaron y pesaron los residuos de grano de café durante una semana, para determinar la generación diaria y semanal; se montaron los diferentes tratamientos de las lombricompostas. Asimismo, se hizo una caracterización inicial tanto de la composta madura como de los residuos de café de grano; el monitoreo de temperatura, humedad, pH y conductividad eléctrica en los tratamientos una vez a la semana, durante siete semanas, para asegurar y

mantener las condiciones adecuadas que permitieron la eficiencia de los tratamientos; y por último, se realizó la caracterización final de las lombricompostas para analizar cuál de los tratamientos fue el más efectivo, tomando principalmente como base lo obtenido en las pruebas de fitotoxicidad.

La realización de este estudio permitió conocer la generación semanal de los residuos de café de grano la cual correspondió a 7.658 kg, sin embargo, esta puede variar dependiendo la semana del trimestre y las actividades llevadas a cabo por la comunidad universitaria. También se logró determinar cuál de los tratamientos fue el más efectivo en términos de fitotoxicidad, siendo el tratamiento 2 el más favorable por que el 100 % de las semillas germinaron, obteniendo un índice de germinación de 83.87 %. Esto comprueba la eficiencia de utilizar residuos de café en lombricomposteo para el aumento de nutrientes en el suelo aumentando su fertilidad.

Finalmente, se propusieron recomendaciones en cuanto a la mejora de este proyecto y la gestión adecuada de los residuos de café de grano en la UAM-A. Entre dichas recomendaciones se encuentran: fomentar la separación de residuos de café de grano; promover el tratamiento de residuos de café mediante lombricomposteo a mayor escala, para disminuir la generación total de estos residuos; sellar adecuadamente el recipiente donde se colocaran las lombrices para el vaciado de sus estómagos, y evitar que escapen las lombrices; ajustar las proporciones de residuos de café y composta madura para lograr un equilibrio óptimo entre nutrientes, temperatura, pH y humedad; mantener controlados los parámetros básicos como la temperatura, humedad y oxígeno, para evitar excesos de humedad o escases de esta, evitar la compactación de la lombricomposta y asegurar el bienestar de las lombrices; y finalmente, crear campañas de concientización sobre la gestión adecuada de los residuos de café para aprovechar al máximo los beneficios de estos residuos.

Los hallazgos de este proyecto permiten plantear estrategias para el manejo de estos residuos dentro de la universidad, contribuyendo a la minimización de los impactos negativos por la generación de los residuos de café de grano.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, mi segunda casa durante estos años de formación. Esta institución no solo me brindó un espacio de aprendizaje y crecimiento académico, sino también un ambiente en el que pude desarrollarme y crecer como persona.

Agradezco al CONAHCYT por el financiamiento a través del proyecto y servicio social ***Diseño, Síntesis y Caracterización de Materiales Estructurados Persistentes y no Persistentes para Aplicaciones Biomédicas***, que me permitieron continuar con mis estudios en el último año de mi carrera.

Mis más sinceros agradecimientos a mis asesoras la Mtra. Alejandra Santana Cruz y la Dra. Arely Areanely Cruz Salas, por su apoyo y dedicación ofrecidos a lo largo del trimestre en el que se realizaba mi proyecto de investigación. Siempre conté con su disponibilidad y orientación, lo que permitió desarrollar eficientemente mi proyecto de investigación.

Al Dr. Juan Carlos Álvarez Zeferino, por su donación de composta de las pilas de la planta piloto de composta, y por prestar material para el monitoreo de los tratamientos de lombricomposta.

A mis padres, Beatriz Adriana Cerón Vázquez y Daniel Torres Ayala. Con su apoyo incondicional, esfuerzo y amor me brindaron las herramientas necesarias que me permitieron desarrollarme académicamente dentro de la universidad. Gracias a su constante motivación, impulso y dedicación he podido crecer como persona.

A mis amigos y compañeros, en especial a Brenda Anita, Luis Bermúdez, Natalia Martínez, Paloma Beltrán, Vicente Chávez, Sergio Domínguez, Luis Chávez, Emily Moreno, Thaily Bautista, Sarahí Sánchez, Ana Gutiérrez, Alexis Delgado, Itzel Taboada, Randall Vargas, Rebeca Romero, Carlos Piñón, Jair Pintor, Jorge Jiménez y Karen Mateo, quienes me ofrecieron experiencias únicas e inolvidables. Gracias por brindarme su apoyo a lo largo de mis estudios universitarios, en especial en la etapa final de mi proyecto.

Dedicatoria

Dedico esta investigación a mis padres, Beatriz y Daniel, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y motivación en cada etapa de mi vida. Siempre han estado presentes en cada situación de mi vida, tanto en mis momentos de felicidad celebrando mis logros y alegrías, como en mis momentos de desaliento brindándome su apoyo, paciencia y comprensión incondicional. Su amor y sacrificio me han permitido alcanzar este gran logro.

A mi hermana Carolina Torres Cerón, mi confidente y compañera de vida. Por estar siempre a mi lado para escucharme y aconsejarme. Y a mi hermano Erick Daniel Torres Cerón, por ser esa personita especial cuya inocencia y alegría ilumina mis días. Son mi inspiración para nunca rendirme y dar siempre lo mejor de mí.

Finalmente, a mi prima Tania Arely Torres Torres. Por mostrarme esta grandiosa universidad en la que estoy por culminar mis estudios. Tu apoyo y orientación me ayudaron a elegir esta institución, que se convirtió en uno de mis lugares favoritos.

Tabla de contenido

Declaratoria	II
Resumen	III
Agradecimientos.....	V
Dedicatoria	VI
Tabla de contenido	VII
Lista de tablas	X
Lista de figuras	XI
1. Introducción.....	1
2. Marco teórico	4
2.1 Residuos	4
2.1.1 Clasificación.....	4
2.1.2 Generación y composición en Ciudad de México	5
2.2 Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco	6
2.2.1 Generación y composición de residuos sólidos	6
2.2.2 Manejo de residuos orgánicos	9
2.3 Residuos de café	10
2.3.1 Clasificación de residuos de café.....	11
2.3.2 Impacto ambiental del café sin gestión adecuada	13
2.3.3 Beneficios del tratamiento de residuos de café mediante lombricomposteo	15
2.4 Lombricomposteo.....	16
2.4.1 Parámetros básicos	17
2.4.2 Tipos de lombrices utilizadas	18
2.4.3 Anatomía y características de <i>Eisenia foetida</i>	20

2.4.4	Ventajas y desventajas de la lombricomposta	23
2.4.5	Productos obtenidos	25
3.	Antecedentes	27
4.	Justificación.....	30
5.	Objetivos	31
5.1	Objetivo general	31
5.2	Objetivos específicos	31
6.	Metodología	32
6.1	Recopilación de la información	33
6.2	Obtención de la muestra representativa	34
6.3	Montaje de los tratamientos	36
6.4	Caracterización de los sustratos y de la lombricomposta	39
6.5	Monitoreo del proceso.....	46
6.6	Evaluación de la eficiencia de los tratamientos.....	49
6.7	Recomendaciones	51
7.	Análisis y discusión de resultados.....	52
7.1	Generación de residuos de café	52
7.2	Caracterización inicial de los sustratos	52
7.3	Control del proceso en los tratamientos.....	60
7.4	Caracterización final.....	65
7.5	Eficiencia de los tratamientos	77
7.6	Recomendaciones	84
8.	Conclusiones.....	86
9.	Referencias bibliográficas	87
10.	Anexos.....	95

10.1 Encuesta sobre el manejo de residuos sólidos en la cafetería de Barra Fría UAM-A.....	95
---	----

Lista de tablas

Tabla 2-1. Generación diaria de residuos sólidos en la UAM-A.....	7
Tabla 2-2. Características de las lombrices más utilizadas para el lombricomposteo	19
Tabla 6-1. Composición de la composta y residuos de café según el tipo de tratamiento	37
Tabla 6-2. Métodos utilizados para la caracterización de cada uno de los parámetros	39
Tabla 7-1. Generación en kg de residuos de granos de café en la UAM-A	52
Tabla 7-2. Resultados obtenidos en la caracterización inicial de los residuos de café	53
Tabla 7-3. Resultados obtenidos en la caracterización inicial de la composta madura	54
Tabla 7-4. Valores obtenidos para la determinación de materia orgánica	59
Tabla 7-5. Valores obtenidos de materia orgánica, nitrógeno total y relación C/N.	68
Tabla 7-6. Resultados obtenidos en la prueba de fitotoxicidad de todos los tratamientos.....	77
Tabla 7-7. Resultados promedios en la prueba de fitotoxicidad	80
Tabla 7-8. Datos obtenidos en la medición de retícula de las semillas de lechuga	82
Tabla 7-9. Cantidad de lombrices y cocones hallados en los tratamientos	83
Tabla 7-10. Cantidad en promedio de lombrices y cocones hallados en los tratamientos.....	83

Lista de figuras

Figura 1-1. Representación de la clasificación de los residuos	1
Figura 1-2. Programa SeparAcción por un mejor UAMbiente	3
Figura 2-1. Composición de los residuos en la CDMX	6
Figura 2-2. Generación de RSU de la UAM-A del 2004 a 2022	7
Figura 2-3. Composición de subproductos de los residuos generados en la UAM-A	9
Figura 2-4. Ejemplo de humus de lombriz obtenido del proceso de lombricomposteo	16
Figura 2-5. Taxonomía de la lombriz roja californiana	20
Figura 2-6. Ciclo de vida de la lombriz roja californiana	23
Figura 6-1. Diagrama de flujo de las etapas del proyecto	32
Figura 6-2. Evidencia de la aplicación del cuestionario	33
Figura 6-3. Pesaje de la generación de residuos de café	34
Figura 6-4. Método de cuarteo de los residuos de café en grano ("a " y "b") y de la composta madura ("c" y "d")	35
Figura 6-5. Vaciado de los estómagos de las lombrices.....	36
Figura 6-6. Pesajes de las proporciones correspondientes.....	38
Figura 6-7. Vista frontal de los tratamientos montados	38
Figura 6-8. Vista superior de los tratamientos montados	39
Figura 6-9. Muestras sometidas a calcinación en mufla a 650 °C.....	40
Figura 6-10. Equipo destilador Kjeldahl.....	42
Figura 6-11. Cartas que indican colorimétricamente la concentración de los macronutrientes.....	44
Figura 6-12. Toma de temperatura con termómetro digital.....	47
Figura 6-13. Puntos específicos para registrar la temperatura.....	47
Figura 6-14. Determinación del pH de las muestras	48
Figura 6-15. Determinación de la conductividad eléctrica	48
Figura 6-16. De mostración de la "prueba de puño" para determinación de humedad	49
Figura 7-1. Porcentaje de humedad de los residuos de café de grano	54

Figura 7-2. Porcentaje de humedad de la composta madura.....	55
Figura 7-3. Conductividad eléctrica de la composta y de los residuos de café	55
Figura 7-4. pH de los residuos de café de grano.....	56
Figura 7-5. pH de la composta madura	56
Figura 7-6. Nitrógeno presente en residuos de café	57
Figura 7-7. Nitrógeno presente en composta madura	57
Figura 7-8. Potasio presente en los residuos de café de grano	58
Figura 7-9. Potasio presente en la composta madura.....	58
Figura 7-10. Fósforo presente en los residuos de café de grano	58
Figura 7-11. Fósforo presente en composta madura.....	58
Figura 7-12. Variación de porcentaje de materia orgánica en los residuos de café	59
Figura 7-13. Variación de porcentaje de materia orgánica en la composta madura	60
Figura 7-14. Variación de la temperatura promedio a lo largo del proceso de cada tratamiento	61
Figura 7-15. Variación de la temperatura del Tratamiento 1	62
Figura 7-16. Variación de la temperatura del Tratamiento 2.....	62
Figura 7-17. Variación de la temperatura del Tratamiento 3.....	63
Figura 7-18. Variación de la temperatura del Tratamiento control	63
Figura 7-19. Variación de pH durante el monitoreo de los tratamientos	64
Figura 7-20. Variación de la conductividad eléctrica durante el monitoreo de los tratamientos.....	65
Figura 7-21 Variabilidad en el porcentaje de humedad de todos los tratamientos	66
Figura 7-22. Humedad promedio para cada tratamiento y el control.....	67
Figura 7-23. Variabilidad del porcentaje de materia orgánica entre las réplicas de cada tratamiento.....	69
Figura 7-24. Porcentaje promedio de materia orgánica entre los tratamientos	70
Figura 7-25. Variabilidad del nitrógeno total de los tratamientos	71
Figura 7-26. Promedio del porcentaje de nitrógeno total en todos los tratamientos	71

Figura 7-27. Variabilidad de la relación C/N de todos los tratamientos	72
Figura 7-28. Promedio de la relación carbono/ nitrógeno entre los tratamientos ..	73
Figura 7-29. Nitrógeno presente en Tratamiento 1 “a”, Tratamiento 2 “b”, Tratamiento 3 “c” y Control “d”	74
Figura 7-30. Fosforo presente en Tratamiento 1 “a”, Tratamiento 2 “b”, Tratamiento 3 “c” y Control “d”	75
Figura 7-31. Potasio presente en Tratamiento 1 “a”, Tratamiento 2 “b”, Tratamiento 3 “c” y Control “d”	76
Figura 7-32. Comparación del crecimiento de retícula entre tratamientos	78
Figura 7-33. Crecimiento de retícula promedio de los tratamientos	78
Figura 7-34. Comparación del índice de germinación entre todos los tratamientos	79
Figura 7-35. Índice de germinación promedio de los tratamientos	80
Figura 7-36. Pruebas de fitotoxicidad de semillas de rábano	81
Figura 7-37. Pruebas de fitotoxicidad de semillas de lechuga	81

1. Introducción

Actualmente, la gestión de residuos se ha convertido en un gran desafío global. La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) define a los residuos como “cualquier material o producto que el propietario decide desechar; estos materiales se encuentran tanto en estado sólido o semisólido, como en estado líquido o gaseoso y se pueden almacenar en recipientes o depósitos. Todos los residuos deben ser tratados y tener una disposición final tal como se indica en esta ley y demás normatividades y lineamientos derivados de la misma” (Cámara de Diputados del H. Congreso, 2023). Dentro de los residuos existen tres categorías: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP). En la Figura 1-1 se muestran las categorías.



Figura 1-1. Representación de la clasificación de los residuos. Tomado de (Consultores CGS, 2021)

Los residuos sólidos urbanos (RSU) se definen como aquellos “residuos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro del establecimiento o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre y cuando no sean considerados como otro tipo de residuos”

(Cámara de Diputados del H. Congreso, 2023). Los residuos orgánicos se incluyen en los RSU y son aquellos que contienen materiales biodegradables como restos de comida y desechos de jardín, un ejemplo de ellos son los residuos de café en grano. En la investigación titulada “Revalorización de los residuos del cultivo del café: rumbo a una economía circular” se analiza la cantidad de residuos de café que se producen en México, en el 2018 se estimaron 300,997.35 toneladas (Claudia et al., n.d.).

La Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco (UAM-A) se ubica en Av. San Pablo No. 420 Col. Nueva el Rosario C.P. 02128, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX. Ocupa un área de 190,500 m² de los cuales 72,300 m² son áreas verdes. Además, en el 2022 la matrícula promedio de estudiantes fue de 15,529 personas, mientras que el personal docente activo fue de 981 personas y el personal administrativo de 2,019 personas (Carrillo, 2022). La UAM-A es una institución académica reconocida por su compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental, por lo que la generación de residuos es un aspecto importante que considerar.

En el año 2003 se impulsó el ***Programa de Gestión Integral de Residuos (SeparAcción por un mejor UAMbiente)*** que tiene como objetivo incrementar la conciencia de la comunidad universitaria sobre la problemática ambiental de la universidad (Angulo, 2009a). Luego de 10 años de impulsar este programa, es decir, en el 2013, se reciclaron exitosamente 112 toneladas de residuos, de los cuales 0.3 fueron latas, 8.5 PET, 11.6 residuos de vidrio, 13.5 Tetra Pak, 28 cartón y 50 papel; todos estos residuos se categorizan como residuos recuperables, y se generan en promedio 548.4 kg mensualmente (Figura 1-2). Otro dato importante para destacar es que, en el año 2018 se generaron en promedio 1,474 kg de residuos diarios en la UAM-A (AlephUAM_A, 2020). Además del programa SeparAcción, en noviembre de 2023 inauguró la planta piloto de composta de la UAM-A en la cual actualmente se realiza el compostaje de únicamente los residuos de poda y jardinería generados en la universidad (Grande, 2023).



Figura 1-2. Programa SeparAcción por un mejor UAMbiente. Tomado de (Separación UAM Azcapotzalco, 2022)

Además de lo antes mencionado, la UAM-A cuenta con dos tipos de servicios de cafetería, las cuales son:

- Subsidiado. Ofrece alimentos con condiciones adecuadas de higiene, variedad y balance nutricional a la comunidad universitaria en desayuno y comida a costos de subsidiado (\$2.50 y \$3.50, respectivamente), también ofrece una cena a un precio bajo de \$20.00 pesos por cena (Elizarrarás, 2024).
- Barra fría (gourmet). Ofrece venta de refrigerios como baguettes, ensaladas, hot dogs, pastelería, bebidas calientes y frías a precio comercial.

Los residuos de cada comida que se generan, en ambos tipos de servicios, son RSU que se clasifican en orgánicos, incluyendo los restos de comida (escamoché), e inorgánicos. Derivado de lo anterior surge el interés por trabajar con el tratamiento de los residuos de granos de café de la cafetería de barra fría, de los cuales actualmente se desconoce la cantidad generada en la universidad, así como la disposición que se le da los mismos.

2. Marco teórico

A continuación, se aborda cada uno de los temas de interés, en los que se incluyen la definición y clasificación de los residuos, su generación y composición tanto en la Ciudad de México como en la UAM-A. Además, se mencionan los programas de gestión de residuos implementados en la UAM-A. Posteriormente, la investigación se enfoca en aspectos más específicos, como los residuos de café, sus impactos ambientales, y los beneficios de su tratamiento para mitigar dichos efectos. Finalmente, se presenta el lombricomposteo como una alternativa viable, en el que se detalla su procedimiento, características, ventajas y los parámetros que determinan su eficiencia, así como los productos obtenidos una vez finalizado el proceso.

2.1 Residuos

Los residuos según la LGPGIR se definen como “el material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven” (Cámara de Diputados del H. Congreso, 2023).

2.1.1 Clasificación

Según la LGPGIR los residuos se clasifican en tres diferentes categorías, las cuales se definen a continuación:

Residuos sólidos urbanos (RSU)

“Residuos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías

y lugares públicos, siempre que no sean considerados como residuos de otra índole” (Cámara de Diputados del H. Congreso, 2023).

Residuos de manejo especial (RME)

“Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores, es decir, por personas físicas o morales que generen 10 toneladas o más en peso bruto total de residuos sólidos urbanos anualmente” (Cámara de Diputados del H. Congreso, 2023).

Residuos peligrosos (RP)

“Residuos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establecen en dicha Ley” (Cámara de Diputados del H. Congreso, 2023).

2.1.2 Generación y composición en Ciudad de México

Según el Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México (CDMX), en el año 2020 se estimó una generación de residuos de 12,306 toneladas por día, lo que representa una disminución global del 6.41 % en comparación al año anterior, es decir, se generaron 843 toneladas menos al día que en 2019. Sin embargo, en el 2021 se observó un incremento de 49 toneladas diarias respecto al año 2020, alcanzando una generación de 12,355 toneladas diarias de residuos en la CDMX. Este aumento podría deberse a que en el año 2021 se estimó un crecimiento de la población. En cuanto a la generación de residuos per cápita se estimó una generación de 1.071 kg/día/habitante en el año 2021 (SEDEMA, 2022).

La composición de los residuos en la CDMX se clasifica en cuatro categorías diferentes: 45 % corresponde a residuos de manejo especial, 35 % de inorgánicos con potencial de reciclaje, 12 % de residuos orgánicos y 8 % de inorgánicos de aprovechamiento limitado. En la Figura 2-1 se muestra esta composición (SEDEMA, 2022). Para este proyecto de investigación, la alcaldía de interés es Azcapotzalco,

porque es donde se encuentra ubicada la universidad en donde se desarrolló esta investigación, según el Inventario de Residuos Sólidos 2021, en la alcaldía Azcapotzalco se generaron 583 toneladas por día durante ese año (SEDEMA, 2022).

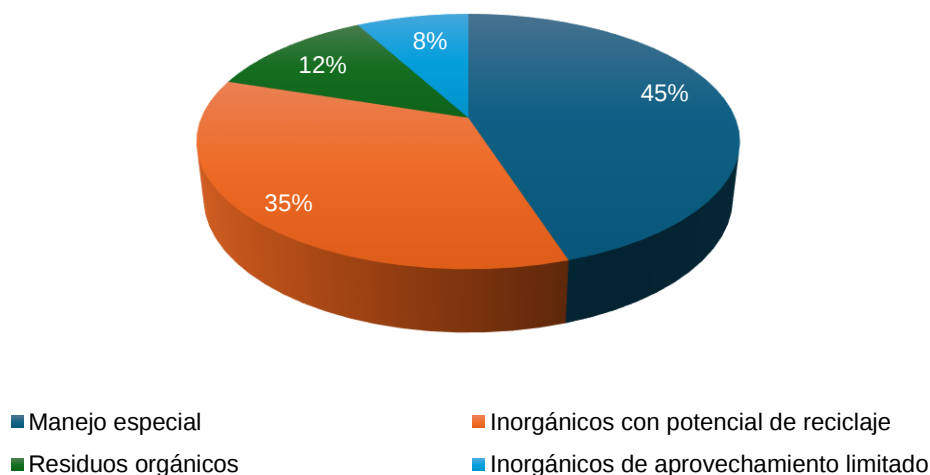


Figura 2-1. Composición de los residuos en la CDMX

2.2 Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

La gran cantidad de personas que conforman la unidad Azcapotzalco de la UAM, entre estudiantes, docentes y personal administrativo, tienen un impacto significativo en la generación de residuos diarios. A continuación, se describe la cantidad y composición de los residuos generados en la comunidad universitaria, además del manejo que se les da dentro de la institución.

2.2.1 Generación y composición de residuos sólidos

Datos del 2018 reportaron que la UAM-A contaba con un total de 18,529 personas, y se estimó que por día se generaba en promedio 1,474 kg de residuos (AlephUAM_A, 2018) lo que equivale a una generación per cápita de 0.080 kg/hab/día. En la Tabla 2-1 se muestra el promedio de la generación diaria de los residuos encontrados dentro de la unidad ese mismo año.

Tabla 2-1. Generación diaria de residuos sólidos en la UAM-A

Tipo de residuo	Promedio diario (kg)	Destino final
Jardinería	344	Composteo
Recuperable	27.42	Reciclaje
Todo lo demás	1,094.32	Selección y valorización

Por otro lado, para el periodo de 2004 a 2022 se tienen registros más detallados de la generación y composición de los residuos sólidos urbanos de la UAM-A. Estos datos se lograron obtener gracias a una de las practicas que se realizan trimestre con trimestre en la UEA “Taller de Residuos Sólidos Urbanos y Suelos”. En dicha actividad, los alumnos realizan un estudio y análisis sobre la generación y composición de los RSU de la UAM-A durante un periodo de una semana.

En la Figura 2-2, se muestran los registros de la generación anual de los residuos sólidos urbanos generados en la UAM-A proporcionados por el proyecto de investigación de Jocelyn Navarrete Contreras (Navarrete, 2024).

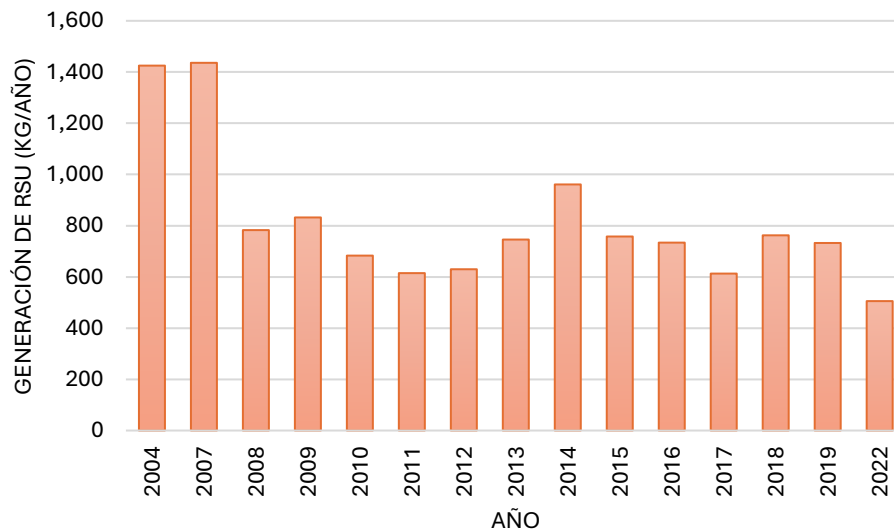


Figura 2-2. Generación de RSU de la UAM-A del 2004 a 2022

En la Figura 2-2, se muestra una gran variabilidad en cuanto a la generación de RSU a través de los años, es decir, no se observa una tendencia clara. Sin embargo, se observa que la generación ha reducido en un 64.82 %, mientras que en el año 2007 se generaron 1,436.4 kg/día, en el 2020 se redujo esta generación a 505.43 kg/día (Navarrete, 2024).

Lo anterior indica la eficiencia de los programas ambientales que se han implementado en la universidad para disminuir la generación de residuos. Programas tales como, el programa de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS) conocido comúnmente como “SeparAcción por un mejor UAMbiente”; programa de separación de plásticos para reciclarse “Really de Separacción”; la planta piloto de composta inaugurada el año pasado; y la implementación de usar recipientes reutilizables como vasos, termos, taza y topers, para recibir los alimentos en la cafetería de la unidad.

En cuanto a la clasificación de subproductos, en la Figura 2-3 se observa la composición promedio de los residuos generados dentro de la Unidad, reportados en el estudio realizado por Jocelyne Navarrete Contreras. Los residuos “**plásticos mixtos**” son los que se presentan en mayor proporción, con un 23 %, de los cuales una parte es reciclable, dependiendo de su clasificación y nivel de contaminación. Las categorías de “papel sanitario” y el “**papel y cartón**” representan el 20 % por separado de la composición total, el papel sanitario es un residuo no valorizable ni reciclable debido a su condición de uso, mientras que el papel y cartón resultan ser altamente valorizables y reciclables si no están contaminados. Los residuos orgánicos se presentan en un 15 %, los cuales pueden ser valorizados para procesos de compostaje o lombricompostaje.

Las demás categorías como el vidrio, textiles, envases multicapa, metales y otros, presentan porcentajes inferiores a 6 %. Los “**empaques multicapa y Tetrapak**”, “vidrio” y el “metal” (con el 5, 4 y 2 % de composición, respectivamente) usualmente se consideran reciclables, mientras que los residuos categorizados como “**algodón, trapo y textil**” representan el 2 % de la composición total, y pueden considerarse reciclables según su grado de contaminación.

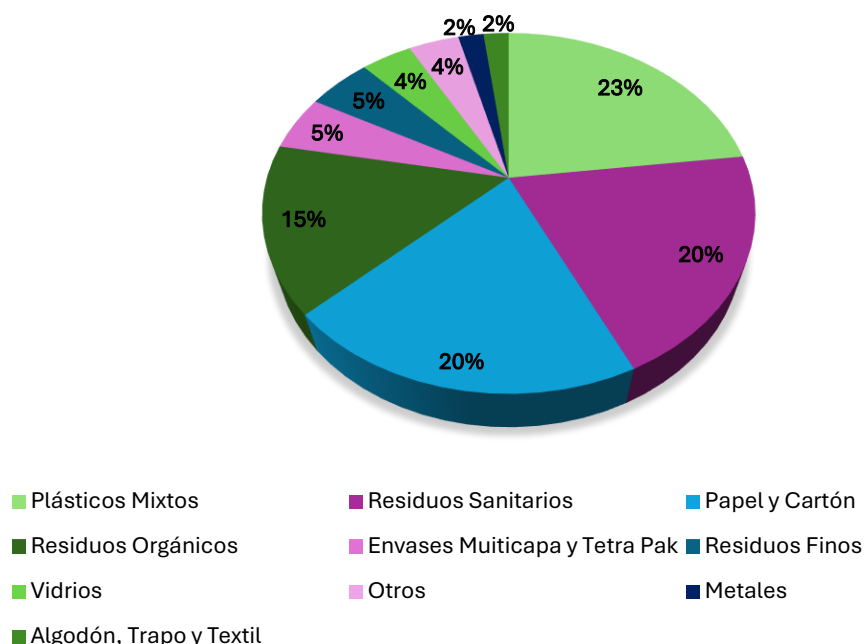


Figura 2-3. Composición de subproductos de los residuos generados en la UAM-A

2.2.2 Manejo de residuos orgánicos

Como se mencionó anteriormente, en la UAM-A existen diversos programas ambientales, en los que se destaca el programa “SeparAcción por un mejor UAMbiente” creado en octubre de 2003, este programa busca cumplir con la normatividad ambiental en materia de residuos sólidos, además de fomentar la educación ambiental en todo el entorno universitario, concientizando a estudiantes, profesores y trabajadores sobre la problemática de los residuos generados dentro de la universidad (Angulo, 2009a).

El programa se desarrolla en tres etapas:

- Primera etapa. Se realiza la separación de los residuos sólidos en dos fracciones: **recuperables** (envases de PET, vidrio, aluminio y Tetrapak) y no **recuperables** (todo lo demás). Para ello, se colocaron 118 pares de botes en diferentes zonas dentro de la unidad; los botes blancos están destinados para residuos recuperables, y los rojos para todo lo demás. Posteriormente, el personal de intendencia recoge estos residuos y los traslada al Centro de

Acopio de la universidad, donde se revisan, acondicionan, pesan y envían a su destino final ya sea para su tratamiento, reciclaje o relleno sanitario (Angulo, 2009a).

- Segunda etapa. Inició en julio del 2004, se añadieron 73 pares de botes en áreas donde eran necesarias (pasillos, escaleras, áreas verdes, cafetería, kioscos, biblioteca), evitando así que los residuos fueran arrojados en zonas verdes o pasillos. También se mejoró la señalización en los contenedores (bote blanco incluye residuos “recuperables” y el bote rojo “todo lo demás”) y se diseñó un nuevo sistema de separación de residuos dentro de las oficinas (Angulo, 2009a).
- Tercera etapa. Se amplió la recolección en áreas que no habían sido contempladas en las primeras etapas, como talleres, laboratorios de docencia e investigación, fotocopiado y mantenimiento. Se logró un convenio con empresas como *Hewlett-Packard* e *Industrias Kores*, los cuales reciben residuos de cartuchos de tinta y tóners que posteriormente son reciclados por las mismas empresas (Angulo, 2009b).

Un dato importante a resaltar, es que en esta separación de residuos no se contemplan los generados en la cafetería ni en los quioscos de la UAM-A, ya que estos son recolectados por el personal de cafetería quienes se encargan de entregarlos diariamente a la empresa “Ambientum” (Navarrete, 2024).

Finalmente, en cuanto a los residuos de jardinería y poda, recientemente se inauguró la planta piloto de composta cuyo encargado es el Dr. Juan Carlos Álvarez Zeferino, en esta planta se realiza el compostaje únicamente de residuos de poda y jardinería generados en las instalaciones de la UAM-A.

2.3 Residuos de café

En México se generaron 300,997.35 toneladas de residuos de café en el 2018 (Claudia et al., n.d.), de los cuales el 43 % corresponde a la pulpa del café. Este residuo resulta ser el más preocupante de todos los subproductos generados en la

industria del café, porque su degradación microbiana puede tardar semanas o hasta meses, lo que provoca una acumulación considerable de este residuo (R. Rodríguez et al., 2013).

Actualmente no se conoce la generación de residuos de café en la UAM-A. Sin embargo, es importante conocer esta información debido al gran impacto ambiental en la generación de residuos, lo que permitiría implementar estrategias para su reducción y aprovechamiento de cada uno de los residuos producidos.

2.3.1 Clasificación de residuos de café

Con base en las definiciones de clasificación de residuos, se considera que los residuos de café de grano se clasifican como RSU, ya que se generan en los hogares, restaurantes, cafeterías y comercios. Parte de estos residuos son considerados orgánicos debido a sus características naturales y su facilidad para descomponerse biológicamente. Pero también se incluyen residuos inorgánicos provenientes del empaquetado, etiquetado y distribución. En la producción de café, se estima que solo el 5 % del café se aprovecha en la elaboración del café para su consumo, mientras que el 96 % restante corresponde a los residuos generados (N. Rodríguez & Zambrano, 2010), es impresionante la cantidad de residuos desperdiciados.

Existen dos procesos principales que se emplean para la obtención del café, y los cuales generan distintas fracciones de residuos dependiendo el método empleado. El método realizado en seco genera residuos como la piel, pulpa, mucilago y cascarilla, todos en una misma fracción. Mientras que el método húmedo permite recuperar cada uno de estos residuos generados en tres fracciones diferentes, la piel y la pulpa en una sola fracción, el mucilago y azúcares solubles en una segunda fracción y la cascarilla en una tercera fracción. Ambos métodos tienen sus pros y contras, por un lado, el método seco resulta ser viable porque no necesita de mucha agua para su producción y no se generan aguas residuales, por el contrario, el método húmedo implica un mayor consumo de agua, pero facilita un aprovechamiento más específico de los residuos al separarlos por fracciones. A

continuación, se enlistan los subproductos orgánicos obtenidos de la fabricación del café (Portte Café, n.d.; N. Rodríguez & Zambrano, 2010):

- Cáscaras de café. Son el principal residuo generado en la producción del café, este se conforma de la piel seca, la pulpa, el mucilago y el pergamino. En masa seca, este residuo equivale al 12 % de la cereza, es decir, se producen 0.18 toneladas de cascara de café por cada tonelada de café cosechado. Mientras que, en masa húmeda, las cáscaras de café representan entre un 40 a 50 % de masa de fruto fresco.
- Pulpa de café. Es el primer producto obtenido en el despulpado del procesamiento del café, y equivale al 43.58 % de la pérdida obtenida en la fabricación del café.
- Mucilago. Se genera en la etapa de desmucilaginado, en base húmeda su generación equivale al 14.85 %.
- Pergamino y película plateada. Se obtienen en la etapa de trillado, representan una generación del 4.2 %.
- Borra de café (grano). Este residuo se genera en la fabricación de café soluble, durante la preparación de la bebida, representa el 10 % de masa del fruto fresco.

Además de estos residuos orgánicos, la industria cafetera también genera residuos inorgánicos relacionados con el empaque y distribución del producto. Algunos ejemplos son (Melo, 2023a):

- Plásticos. Son el material mayormente utilizado para el empaquetado del café, debido a su alta durabilidad y conservación del producto. La producción de estos empaques se basa en materiales derivados del petróleo provocando emisiones a la atmósfera y agotando los recursos, además tienden a ser no reutilizables, lo que aumenta la generación de residuos.
- Aluminio. Se utilizan para proteger el café del oxígeno y la humedad. La producción de este material incluye el consumo de energía, y en ocasiones no es fácilmente reutilizado por su combinación con otros materiales.

- Papel. Es utilizado como bolsa o filtro para el café. A pesar de ser una materia renovable, contribuye a la deforestación y se consumen grandes cantidades de agua y energía para su producción.

2.3.2 Impacto ambiental del café sin gestión adecuada

Es impresionante como algo tan común en nuestra vida cotidiana, como tomar un par de tazas de café, puede provocar daños ambientales significativos a lo largo de todo su proceso de producción, consumo, y disposición final. A continuación, se detallan los principales impactos ambientales que ocurren cuando no se gestiona adecuadamente la producción y disposición final de los residuos del café.

Emisión de gases de efecto invernadero

A lo largo de las diferentes etapas de la producción del café, desde la tala de árboles la cosecha, la producción, el transporte, y hasta su disposición final, se generan emisiones de gases de efecto invernadero debido al consumo de energía y a la maquinaria utilizada durante todo el proceso de producción del café (Mcmillan, 2023). Se estima que una taza de café genera 280 g de CO₂, y para cafés preparados como un latte o capuchino su huella ecológica aumenta a 410 g de CO₂ y 550 g de CO, respectivamente (Maslin & Nab, 2021). Es importante implementar tecnologías sustentables como las energías sostenibles para reducir significativamente estas emisiones.

Deforestación y pérdida de biodiversidad

La expansión del cultivo del café, especialmente en monocultivos, provoca la deforestación de bosques tropicales (Mcmillan, 2023), esto implica la destrucción de hábitats de diversas especies, reducción de la biodiversidad y alteración del equilibrio de los ecosistemas (Melo, 2023b). Todo esto se ve afectado debido a la destrucción de bosques, los cuales funcionan como sumideros para absorber dióxido de carbono (CO₂), lo que permite disminuir sus altas concentraciones en la atmósfera.

Degradación del suelo y erosión

La producción acelerada del café contribuye a la degradación del suelo debido a la pérdida de materia orgánica y la erosión, especialmente en áreas inclinadas, donde las intensas lluvias provocan la pérdida y degradación del suelo (Melo, 2023c). Este problema empeora por la eliminación de la cobertura forestal y la práctica de monocultivos, provocando la infertilidad del suelo y que esté sea más susceptible a la erosión, debido a que la degradación afecta la capacidad del suelo para el crecimiento de las plantas y la producción agrícola por la reducción de nutrientes y materia orgánica (Mcmillan, 2023).

Contaminación del agua y uso de pesticidas

El uso excesivo de los fertilizantes y pesticidas en el cultivo del café contamina los recursos hídricos cercanos, afectando tanto a los ecosistemas como a las comunidades humanas. Por ello, es importante implementar estrategias sostenibles que permitan disminuir la contaminación de recursos naturales (Mcmillan, 2023). Además existe un gran desperdicio de este recurso hídrico, ya que se ha estimado que para obtener 1 kg de café pergamino seco (capa que cubre la semilla del café durante el proceso de secado) se necesitan de 40 a 60 litros de agua, es una cantidad excesiva de agua que termina por desecharse en cuerpos de agua (Salazar, 2008).

Generación de residuos

Los residuos generados durante la producción y el consumo de café, si no se gestionan adecuadamente, contribuyen a su acumulación en los sitios de disposición final, lo que puede provocar la contaminación del suelo y de los cuerpos de agua. Una recomendación para mitigar este problema ambiental es utilizar los residuos de café como un fertilizante orgánico o como sustrato en un proceso de compostaje. Además, no solo se generan residuos naturales en la producción de café, sino también empaques, los cuales son una gran fuente de contaminación (Mcmillan, 2023). Un claro ejemplo de este problema, según *Internacional Coffee Organization*, es que en todo el mundo se desechan 7,000 millones de cápsulas al año, las cuales tardan hasta 100 años en degradarse (BIOECO, 2021), por ello se

destaca la importancia de solucionar este problema, al optar por el uso de empaques sostenibles como materiales biodegradables o reciclables.

2.3.3 Beneficios del tratamiento de residuos de café mediante lombricomposteo

El lombricomposteo es un tratamiento sostenible ya que no solo acelera la descomposición de los residuos orgánicos como el café, sino que también enriquece el suelo con un alto contenido de nutrientes, mejorando su fertilidad y favoreciendo el crecimiento de las plantas. También ayuda a disminuir el consumo excesivo de fertilizantes químicos, disminuyendo considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero. A continuación, se detallan los múltiples beneficios de producir lombricomposta para tratar los residuos de café:

Reducción de residuos

El tratamiento adecuado de los residuos de café evita que estos terminen en los sitios de disposición final, lugares donde al descomponerse se liberan gases como el metano, que contribuyen al cambio climático. El lombricomposteo es un tratamiento efectivo para reducir la cantidad de residuos de café (Ground to Ground, 2024) porque evitan que se acumulen en los rellenos sanitarios disminuyendo la producción de gases tóxicos y líquidos que contaminan el subsuelo (Prado, 2013).

Suelos nutritivos

A diferencia del compostaje tradicional, que depende únicamente de la acción de microorganismo, en el lombricompostaje intervienen las lombrices, lo que facilita la producción de humus con una mayor concentración de nutrientes (Armes, 2024), tales como nitrógeno, fósforo, potasio y otros minerales necesarios para mejorar el rendimiento de los cultivos. Además, favorece la retención de agua y mejora la estructura del suelo, permitiendo una mejor aireación y vitalidad de las plantas (Ground to Ground, 2024). Este producto obtenido resulta ser un fertilizante más fácil de absorber por las plantas que los fertilizantes químicos (Prado, 2013).

Tratamiento de degradación más efectivo

El lombricomposteo es un método de degradación más rápido y eficiente que el compostaje tradicional. Esto se debe a que las lombrices, junto con los microorganismos, aceleran la descomposición de la materia orgánica, lo que permite finalizar el proceso en la mitad del tiempo (Armes, 2024). En cambio, en la composta tradicional solo los microorganismos participan en la degradación, lo que lo convierte un proceso más lento. Otro punto a favor es que no requiere aireación constante y la digestión de las lombrices produce un humus más fino, permitiendo el crecimiento de las raíces de las plantas (Ground to Ground, 2024).

2.4 Lombricomposteo

El lombricomposteo es un proceso biológico que se utiliza para la degradación de residuos orgánicos mediante la alimentación, crianza, manejo y control de las lombrices a través del consumo de residuos orgánicos y la defecación de estos (Figura 2-4). Este tratamiento se puede montar en pilas, cajones o tanques de diferentes materiales como cemento, plástico y madera.



Figura 2-4. Ejemplo de humus de lombriz obtenido del proceso de lombricomposteo

2.4.1 Parámetros básicos

Es fundamental llevar un monitoreo adecuado de los parámetros básicos del lombricomposteo para asegurar que las condiciones sean óptimas para la supervivencia de las lombrices. El control de estos parámetros también asegura la eficiencia del proceso de descomposición de los residuos orgánicos, lo cual permite obtener un humus de alta calidad. A continuación, se describe cada parámetro básico:

Relación carbono nitrógeno

Este parámetro indica la cantidad de carbono por unidad de nitrógeno contenido en el humus de la lombricomposta. El carbono se encuentra principalmente en residuos vegetales secos, mientras que el nitrógeno se encuentra mayormente en estiércol de animales y en hojas verdes. Para el buen funcionamiento de los microorganismos en la lombricomposta se requiere una relación de 25 a 30 partes de carbón por unidad de nitrógeno. La ausencia de nitrógeno retrasa la composición debido a la disminución de la actividad microbiana (CEDICAFÉ, 2023).

Oxígeno

Para asegurar una buena oxigenación en la lombricomposta, es necesario realizar una aeración adecuada al menos una vez a la semana, lo que favorece la vida microbiana y evita la compactación de la lombricomposta (CEDICAFÉ, 2023), esto podría dificultar la movilidad de las lombrices. Cuando hay una oxigenación insuficiente, los microorganismos cambian su metabolismo pasando de un proceso aerobio a uno anaerobio, lo que produce compuestos volátiles como sulfuro de hidrogeno y amonio los cuales causan olores desagradables.

Temperatura

La temperatura óptima para el lombricomposteo es de 20 a 25 °C. Si la temperatura se encuentra por debajo de 20 °C, las lombrices entran en latencia (CEDICAFÉ, 2023). Este intervalo de temperatura es ideal para su buen funcionamiento y desarrollo. A temperaturas inferiores a 7 °C, las lombrices experimentan un estado de letargo (sueño profundo) que les impide comer y reproducirse (Fuentes, n.d.).

Por otro lado, a temperaturas elevadas, las lombrices pueden deshidratarse debido a la evaporación del agua de sus cuerpos (VermiHumus, n.d.).

Humedad

La humedad optima debe mantenerse entre el 60 y el 70 %, lo cual se controla mediante riego, mezcla constante y realizando la prueba de puño (CEDICAFÉ, 2023). Otra forma de monitorear este parámetro es a través del método gravimétrico, que consiste en determinar la cantidad de agua contenida en una muestra representativa de la lombricomposta. Esto se logra comparando el peso de la muestra húmeda y su peso seco tras someterla a calentamiento durante 2 horas a 60 °C (SECOFI, 1984a). Si la humedad supera estos niveles las lombrices entran en latencia e intentan escapar hacia la superficie; además, podrían ahogarse si hay una saturación de agua. Por otro lado, una humedad baja resulta ser letal para ellas, debido a la pérdida de humedad en su piel, lo que afecta su capacidad para respirar y las lleva a deshidratarse y por ende se mueren.

pH

El pH adecuado para el lombricomposteo debe mantenerse neutro, idealmente entre 6.5 y 7.5, aunque pueden tolerar un ambiente ligeramente alcalino. Un pH ácido puede favorecer el desarrollo de plagas como la planaria (CEDICAFÉ, 2023). El pH del lombricomposteo puede verse afectado por el tipo de residuos utilizados; por ejemplo, los restos de frutas cítricas como el café tienden a bajar el pH, creando un ambiente ácido. La acidificación de la lombricomposta puede irritar a las lombrices y ralentizar el proceso de descomposición, ya que prefieren condiciones alcalinas (Fuentes, n.d.).

2.4.2 Tipos de lombrices utilizadas

La primera descripción de la especie de lombriz *Lombricus terrestris* fue realizada en 1758 por Carl Von Linneo en su “sistema natural”. Tiempo después, en Norteamérica se comenzó a domesticar a las lombrices para su cultivo, con el fin de comercializarlas en tiendas de caza y pesca (CEDICAFÉ, 2023). Actualmente, se

utilizan varias especies de lombrices en explotaciones comerciales, las más comunes son las que se mencionan en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Características de las lombrices más utilizadas para el lombricomposteo

Familia	Género y especie	Color	Temperatura óptima °C	Ciclo de vida (días)	Humedad óptima (%)
Megascolecidae	<i>Eodrilus Eugeniae</i>	Marrón rojizo	25	50 – 70	80
	<i>Perionyx Excavatus</i>	Marrón rojizo	25 – 37	40 – 50	-
	<i>Polypheretima Elongata</i>	Rojizo con franjas amarillas	-	-	-
Lumbricidae	<i>Pherentima Asiática</i>	-	-	-	-
	<i>Eisenia Foetida</i>	Marrón con bandas amarillas	25	45 – 51	80 – 85
	<i>Lombricus Rubellus</i>	Marrón rojizo	-	120 - 170	-
	<i>Dendrobaena Veneta</i>	Purpura rojizo con bandas	15 – 25	100 - 150	-
	<i>Eisenia Andrei</i>	Roja	15 – 25	45 - 51	80 – 85

Entre todas las especies mencionadas en la tabla anterior, la lombriz más utilizada para el lombricomposteo es *Eisenia Foetida*, comúnmente conocida como “coqueta roja” o “lombriz roja californiana”. Esta lombriz es resultado de la cruce entre *Lombricus terrestris* (lombriz de tierra que sale a la superficie) y *Helodrilus foetida* (lombriz maloliente que vive en el estiércol) (CEDICAFÉ, 2023).

2.4.3 Anatomía y características de *Eisenia foetida*

La lombriz roja californiana es capaz de respirar a través de su piel, no tiene dientes por lo que necesita de alimento triturado para poder ingerirlo, su cuerpo está dividido por hasta 120 anillos o segmentos los cuales son músculos que le permiten expandir y contraer su cuerpo para poder moverse (Low Technology Institute, 2018), cada uno de estos anillos se conforman por cerdas llamadas “setae” que le facilita moverse y excavar en el suelo. Cuando llegan a su madurez, en la parte frontal se forma una banda clara conocida como clitelo, el cual es parte fundamental para su reproducción (Briceño & Pérez, 2026) (Figura 2-5).

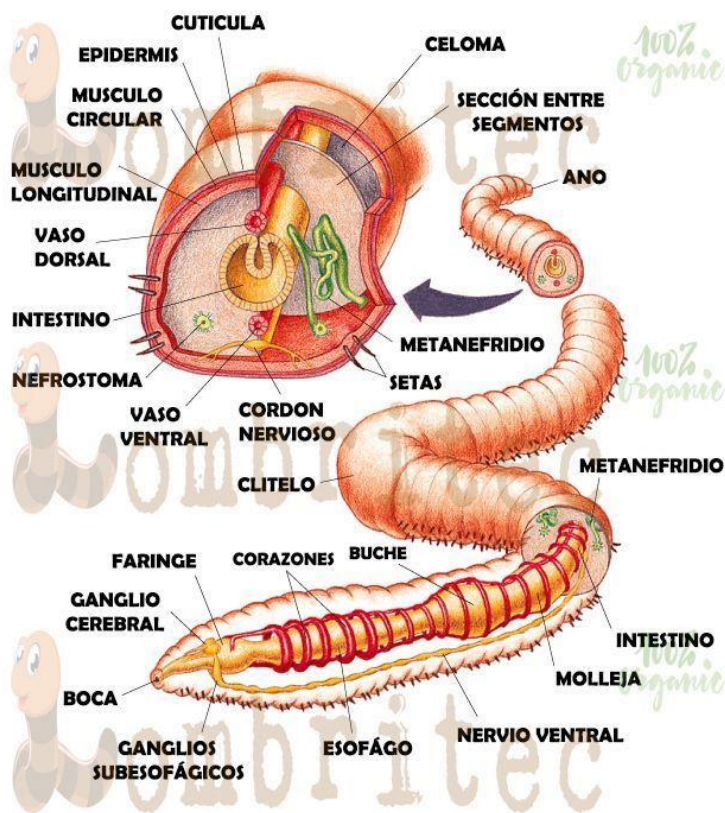


Figura 2-5. Taxonomía de la lombriz roja californiana (Lombritec, n.d.)

Su fisiología está integrada por diferentes sistemas esenciales para cumplir con sus funciones.

Sistema digestivo

En su interior, el sistema digestivo de la lombriz se conforma por una boca pequeña, un esófago que desemboca en el buche (almacena el alimento), el cual se conecta a una molleja (estómago), donde el alimento se tritura antes de digerirse en el intestino. Su aparato digestivo se extiende por la parte trasera de su cuerpo donde los nutrientes son absorbidos y finalmente son expulsados por el ano (Briceño & Pérez, 2026; Uncle Jim's Worm Farm, 2017).

Sistema circulatorio

Posee cinco corazones o “vasos” que se encargan de bombear la sangre a lo largo del cuerpo de la lombriz. El vaso ventral, ubicado en la zona más plana, se encarga de transportar sangre oxigenada, y el vaso dorsal transporta sangre con dióxido de carbono (Briceño & Pérez, 2026).

Sistema respiratorio

La respiración es cutánea por la falta de pulmones, son capaces de intercambiar oxígeno por dióxido de carbono a través de su piel. El sistema circulatorio, permite que la sangre circule a través de capilares ubicados en la cutícula húmeda del cuerpo, lo que favorece la absorción de O_2 y la liberación de CO_2 , por ello las lombrices necesitan la humedad de su cuerpo, porque les permite captar oxígeno (Gracia et al., n.d.).

Sistema reproductivo

Por ser un invertebrado hermafrodito, no se definen por un solo sexo, sin embargo, necesitan de otra lombriz para poder reproducirse. La reproducción ocurre gracias al clitelo, el cual segrega una sustancia mucosa que permite la unión de ambas lombrices durante su copulación (Briceño & Pérez, 2026). El apareamiento ocurre cuando las lombrices se entrelazan en direcciones opuestas haciendo coincidir sus clitelos, permanecen así hasta por 15 min (Gracia et al., n.d.).

Como ya se mencionó anteriormente, esta lombriz es fundamental para la agricultura por su gran aporte al nutrir la tierra y las plantas. Es una especie originaria de Europa, sin embargo, lleva el nombre común “roja californiana”, debido

a que fue en california donde se descubrieron sus múltiples beneficios. Entre sus características se tienen (Fuentes, n.d.; Gallego, 2022; Pur Plant, n.d.).

- A la semana ponen de uno a dos cocones (huevecillos con crías), cada uno con 20 lombrices aproximadamente, su incubación dura entre 12 y 21 días.
- Al nacer son blancas y muy pequeñas, después de una semana se vuelven rosas y cuando son adultas son de color marrón (3 o 4 meses).
- Son ovíparas, su madurez ocurre después de 90 días de eclosionar, y la presencia del clitelo (anillo más grueso de color blanco) indica su madurez sexual.
- Son prolíferas (capaces de duplicar su población cada 3 meses). En condiciones óptimas pueden producir hasta 1,300 lombrices al año.
- Son fotofóbicas, no tienen ojos, sin embargo, tienen células fotosensibles, por lo que deben permanecer en lugares oscuros para sobrevivir.
- Respiran a través de su piel, no tienen pulmones, es por ello por lo que prefieren un intervalo de humedad entre el 50 y 60 %.
- Son hermafroditas, es decir, poseen ambos sexos, pero necesitan de otra lombriz para poder reproducirse.
- Miden entre 6 y 8 cm de largo y su diámetro oscila entre 3 y 5 mm. Pesan tan solo 1 gramo y son capaces de comer lo equivalente a su propio peso. Excretan sus alimentos en forma de humus entre un 60 a 65 % de lo que consumen.
- Los sistemas (nervioso, circulatorio y excretor) se distribuyen en sus anillos. No tienen corazón, pero tienen 5 pares de arcos aórticos que bombean sangre a su cuerpo.
- En condiciones adecuadas de temperatura, pH, humedad, y oxígeno, la población aumenta hasta diez veces en un año y llegan a vivir hasta 14 años.
- Es el único animal que no transmite ni padece enfermedades.

En la Figura 2-6 se ejemplifica el ciclo de vida de la lombriz roja californiana, donde se esquematiza lo mencionado anteriormente.



Figura 2-6. Ciclo de vida de la lombriz roja californiana. Elaborado a partir de Pur Plant (n.d.)

2.4.4 Ventajas y desventajas de la lombricomposta

El lombricomposteo es un proceso de degradación de materia orgánica con múltiples beneficios ambientales, tanto en el suelo del cultivo como para el entorno en general. Son más las ventajas que trae consigo este proceso que las desventajas que se podrían presentar por no tener un buen control del lombricomposteo tal como se muestra en el siguiente listado.

Ventajas

A continuación, se mencionan algunas ventajas de este proceso (Castellanos, 2020; CEDICAFÉ, 2023; Moviento de Jóvenes por el Agua, 2020):

- No hay restricciones ni prohibición de su producción y aplicación a nivel nacional.
- Aumenta el nivel de materia orgánica en el suelo, es decir, el humus se vuelve una alternativa para la restauración de suelos degradados.
- Es un buen fertilizante natural que evita la propagación de plagas, y mejora la salud de las plantas, disminuyendo el uso de fertilizantes químicos.
- Neutraliza la presencia de contaminantes como herbicidas, esteroides fosfóricos y anti criptogámicos, mejorando el cambio iónico planta-suelo.
- Aumenta la retención del agua.
- La inversión inicial no es costosa, por lo que lo hace adaptable a pequeños y grandes productores. Además, reduce costos de uso de fertilizantes.
- Alternativa para el manejo de residuos sólidos orgánicos.
- El humus de lombriz estimula los procesos biológicos de las plantas con sus fitohormonas como: auxinas, giberelinas y citoquinas.
- Es un tratamiento sustentable.
- Inhibe el crecimiento de hongos y bacterias perjudiciales para las plantas.
- Las lombrices mejoran la estructura del suelo, dando una aeración que des compacta el suelo.
- Regula y amortigua el pH y la temperatura.

Desventajas

A continuación, se mencionan algunas desventajas del lombricomposteo (CEDICAFÉ, 2023).

- A bajas temperaturas ($\leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) se alarga el proceso.

- Es susceptible a plagas como las hormigas que se comen los cocones de las lombrices.
- Se requiere un espacio bien diseñado que permita un control adecuado del proceso de lombricomposteo, manteniendo condiciones controladas de temperatura, humedad y oxigenación.

2.4.5 Productos obtenidos

Al finalizar el tratamiento del lombricomposteo, se obtienen productos ricos en nutrientes tal como se explica a continuación:

Humus (lombricomposta)

El humus es el producto principal del proceso del lombricomposteo. Es un abono orgánico rico en nutrientes por su alto contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, producido por la degradación de la materia orgánica a través de las lombrices. El humus estimula los procesos biológicos de las plantas con sus fitohormonas, tales como:

- Auxinas. Permiten el alargamiento de las células de brote, incrementa la floración y aumenta la cantidad y el tamaño de los frutos.
- Giberelinas. Ayudan a la germinación de la semilla, al desarrollo de las plantas, y aumenta el tamaño del fruto.
- Citoquinas. Retardan el envejecimiento de los tejidos vegetales

Estas fitohormonas en conjunto con los altos niveles de ácidos húmicos-fúlvicos y enzimas favorecen el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas (CEDICAFÉ, 2023). El humus es un gran fertilizante orgánico porque mejora las condiciones fisicoquímicas del suelo, aumentando la retención del agua y el intercambio gaseoso que protege al suelo de la erosión, regula el incremento de los nitritos del suelo facilitando su concentración de nutrientes en forma de iones necesarios para las plantas (Gallego, 2022).

Lixiviado

El lixiviado es un líquido viscoso que se obtiene de la fermentación de las excretas de las lombrices y los residuos orgánicos, se compone de microorganismos y ácidos húmicos y fúlvicos. Si su color es muy oscuro, puede incorporarse a nuevas pilas de lombricomposteo o diluirse para utilizarse como fertilizante líquido (CEDICAFÉ, 2023). Los lixiviados tienen la capacidad de mejorar suelos ácidos, debido a su composición química, esto permite la absorción de micro y macroelementos provenientes de las plantas (Pedrotti, 2018).

Lombrices

Las lombrices se reproducen durante el proceso de lombricomposteo y su biomasa puede ser un subproducto muy importante. Estas lombrices se pueden utilizar para iniciar nuevas lombricompostas y así ampliar la cantidad de residuos a tratar para minimizar su generación (CEDICAFÉ, 2023). Las lombrices, además de utilizarse para el lombricomposteo, se pueden aprovechar y utilizar para la producción de alimentos.

Entre estos productos se encuentran la **harina de lombriz** utilizada en la producción de galletas, panes dulces y snacks tanto para consumo humano como para perros, según sea el caso; **carne de lombriz** empleada para la alimentación de animales domésticos, o combinada con otras carnes para consumo humano; y **aceites comestibles** donde la lombriz es aprovechada por su alta concentración de colágeno. Gracias a estos productos, las lombrices representan un beneficio económico para los productores, no solo por la rentabilidad de fabricar alimentos nutritivos y económicos, sino también por el fomento de nuevas investigaciones científicas e innovadoras (Gallego, 2022).

3. Antecedentes

Se han realizado diferentes estudios para el tratamiento de residuos orgánicos de café como, tales como, lombricompostaje, compostaje y co-compostaje, en los que se destacan:

- El aprovechamiento de los residuos de café mediante lombricomposta y bocashi para incrementar el rendimiento del rabanito. Se realizó en la Universidad César Vallejo SAC en Chiclayo, Perú en el año 2023. Sus objetivos fueron recolectar los residuos de café (pulpa fresca, mucilago y pergamino) para elaborar la lombricomposta, analizar los nutrientes físicos y químicos antes y después de aplicar los abonos obtenidos de los residuos de café y finalmente se compararon las diferentes dosis de lombricomposta para determinar el rendimiento del rabanito. Los resultados obtenidos al inicio de la experimentación fueron: pH ligeramente ácido (6.60); baja concentración de sales solubles (1.30 milimhos/cm); deficiencia en la fertilidad del suelo con nutrientes como fósforo (5.70 ppm), calcio (0.42 %), potasio (11.7 ppm), y con un alto valor de materia orgánica (4.16 %). Al realizar los análisis fisicoquímicos tanto de la lombricomposta como el bocashi se obtuvieron resultados similares en ambos casos, mejorando la fertilidad del suelo y obteniendo un aumento de nutrientes como nitrógeno (1.32 % - 1.53 %), calcio (2.27 % - 2.40 %), magnesio (0.78 % - 0.95 %), potasio (0.26 % - 0.30 %) y carbono (15.34 % - 17.85 %) (Manchay & Meza, 2023).
- El compostaje (cáscara y pulpa de café) y co-compostaje (degradación aerobia usando más de una materia prima, en este caso se utilizaron cáscaras de plátano y madera seca blanda, añadiendo también pulpa de café) con residuos sólidos municipales (RSM) separados desde el origen. Este estudio se desarrolló en la Universidad de Jimma, Etiopía en el año 2019. En los resultados se obtuvo que los subproductos de café son óptimos para convertirse en abono maduro y estable, ya sea solos o en conjunto con RSM, y son útiles para la agricultura. Se analizaron diferentes parámetros

como el pH, humedad, carbono orgánico, y macronutrientes nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), relación carbono/nitrógeno, además se menciona la importancia de cumplir con las normas nacionales en cuanto composta. Por último, se demostró que ambos residuos pueden convertirse en composta de alta calidad ya sea por si solos o en conjunto con fracciones de RSU, porque todos sus parámetros estaban dentro de los intervalos aceptables para la buena calidad de la composta para su uso agrícola (Dadi et al., 2019).

- El estudio sobre el compostaje de granos de café mediante la adicción de hongos *Aspergillus sp.* Y *Penicillium sp.* con temperatura controlada (30 °C) en pilas estáticas por lotes, se realizó en la Universidad de la Prefectura de Hiroshima, en la ciudad Shobara, Japón, en el año 2021. A partir de los resultados se observó una mayor actividad enzimática en la degradación de carboximetilcelulosa **CMC**, cafeína, xilano y lignina para el tratamiento con *Penicillium sp.* con valores medios de la Actividad Enzimática Relativa **REA** (por sus siglas en inglés) para degradar CMC (15.57 ± 0.81), cafeína (13 ± 0.1), xilano (2.4 ± 0.038) y lignina (18.35 ± 0.94), comparado con los de *Aspergillus sp.*, con valores de **REA** para la degradación de CMC (7.82 ± 0.61), cafeína (5.17 ± 0.37), xilano (2.17 ± 0.008) y lignina (10.5 ± 0.5). Durante el proceso de compostaje se observaron cambios significativos en sus propiedades químicas: el pH ligeramente ácido de 6.72 varió hasta alcalinizarse a 8.00, además, se observó una degradación significativa de la lignocelulosa durante el composteo siendo del 40.28 % en muestras tratadas por hongos en comparación con tratamiento de control que se presentó 31.10 %. Por otro lado, en la fitotoxicidad se observó que ninguna de las muestras resultó ser tóxica con un índice de germinación del 80.00 %, finalmente los resultados mostraron que las compostas maduraron en un mes, siendo mucho más rápido que otros tipos de compostas como el tradicional (6 meses a 1 año), lombricompostaje (3 a 6 meses) y el método de compostaje doméstico Takakura (3 meses), por lo que se comprueba que la combinación de hongos activadores en el compostaje mejora la actividad enzimática

obteniendo así abonos más efectivos y saludables para el suelo (Asmak et al., 2021).

- El estudio del potencial de la tecnología de compostaje de residuos de café (granos, cáscaras y pulpa) utilizando activadores microbianos para reducir los residuos sólidos en la industria del café, se llevó a cabo en la Universidad Airlangga, Indonesia en el año 2021. Sus objetivos fueron: determinar la composición óptima de materiales orgánicos para producir composta de café que cumplan con la normatividad vigente, además de evaluar el impacto de la composta para la reducción de residuos sólidos y en la sostenibilidad ambiental para la industria del café. Como resultados se tuvo que las proporciones de mejor tratamiento para la composta de residuos de café es de 1.5 kg de granos de café, 1.35 kg pulpa de café, 0.15 kg de cáscaras de café y 3 ml de activador microbiano EM4, también se comprobó que el compostaje a base de residuos de café puede reducir significativamente la generación de estos residuos, el espacio de disposición final y los costos de eliminación. Todo esto fue posible gracias a que los parámetros de pH, conductividad eléctrica, macronutrientes NPK, materia orgánica y relación carbono/nitrógeno presentaron resultados óptimos para una calidad adecuada del suelo analizado (Amalia et al., 2021).

Todos los estudios antes mencionados comprueban la efectividad tanto del composteo como del lombricomposteo para la degradación de los residuos de café en grano, minimizando así la generación de residuos de este y mejorando la fertilidad del suelo. El primer estudio se enfoca principalmente al tratamiento por lombricomposteo para cualquier tipo de residuos de café; mientras que los otros tres estudios, su enfoque principal es tratar los residuos de café tales como la cáscara, los granos y la pulpa del café por composteo o co-composteo.

4. Justificación

Actualmente, la UAM-A cuenta con una planta piloto de composta donde se tratan mensualmente alrededor de 6,880 kg de residuos urbanos orgánicos. A pesar de los esfuerzos de la gestión de residuos orgánicos de la UAM-A, los correspondientes a los granos de café siguen siendo una preocupación ambiental debido a que no hay evidencia de que se lleve a cabo un tratamiento para gestionar los residuos de granos de café generados en la cafetería de barra fría de la UAM-A. El lombricomposteo es una solución efectiva que no solo permite el aprovechamiento de los residuos de café a un bajo costo, sino que también promueve la sostenibilidad y la conciencia ambiental dentro de la comunidad universitaria.

5. Objetivos

A continuación, se menciona el objetivo general y los específicos a cumplir en este proyecto de integración.

5.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad del tratamiento de residuos de granos de café, generados en la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, mediante lombricomposteo.

5.2 Objetivos específicos

- Determinar la generación y manejo actual de los residuos de granos de café generados en la cafetería de barra fría (gourmet).
- Evaluar la calidad de la lombricomposta obtenida en términos de la fitotoxicidad.
- Emitir recomendaciones en cuanto al manejo de residuos de café de grano.

6. Metodología

El presente proyecto se desarrolló dentro de las instalaciones de la UAM-A, en el laboratorio de Química de los Materiales y Nanoestructuras, que se ubica en el primer piso del edificio W. En la Figura 6-1 se muestra el diagrama de flujo de las diferentes etapas desarrolladas a lo largo del proyecto realizado en el trimestre 24P.

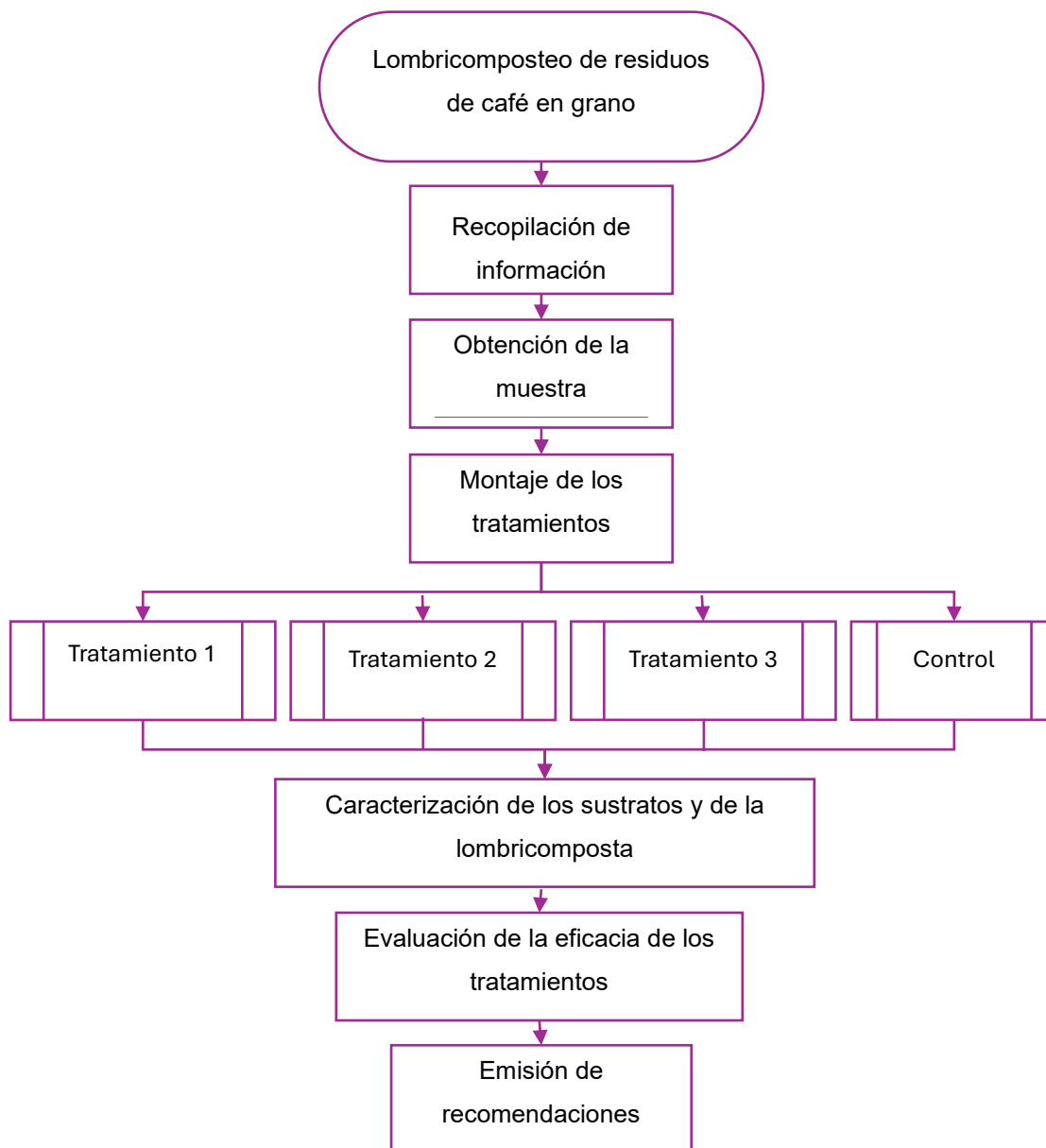


Figura 6-1. Diagrama de flujo de las etapas del proyecto

6.1 Recopilación de la información

Se diseñó un cuestionario con aspectos relevantes sobre la generación de los residuos de granos de café (Anexo 10-1) el cual se aplicó a la Supervisora de barra fría Silvia Lemus el 19 de julio del 2024 (Figura 6-2).



Figura 6-2. Evidencia de la aplicación del cuestionario

Aunado a lo anterior, en la primera semana del trimestre 24P se recolectaron los residuos de granos de café generados durante cinco días hábiles (del 15 al 19 de julio del 2024). Los residuos se recolectaron dos veces al día (una vez por turno), en el turno matutino se recolectaron a las 13:00 h, y los del turno vespertino a las 17:00 h. Posteriormente, se pesaron todos los residuos generados por turno y por día para poder calcular la generación total (Figura 6-3). Todos los residuos se mantuvieron en refrigeración para posteriormente emplearse en la obtención de la muestra representativa, la caracterización inicial y el montaje de los tratamientos.



Figura 6-3. Pesaje de la generación de residuos de café

6.2 Obtención de la muestra representativa

Para esta etapa del proyecto, todos los residuos generados se mantuvieron refrigerados, ya que fueron los que se ocuparon para la obtención de la muestra representativa. Con base en la adaptación de la NMX-AA-015-1985, se realizó el método de cuarteo para obtener la muestra representativa (SECOFI, 1985a). En un cuadrante de 60 x 60 cm se depositaron los residuos de granos de café, los cuales se mezclaron y dividieron en cuatro partes iguales (Figura 6-4 a). Se seleccionaron como muestra representativa de los residuos de dos partes opuestas B y C, eliminando las dos partes restantes tal como se muestra en la Figura 6-4 b, dicha muestra tuvo una masa final de 4.201 kg.

Para la composta madura se realizó el mismo procedimiento, pero tres veces, (Figuras 6-4 c y d), sometiendo en cada cuarteo una masa de 7.5 kg y obteniendo en cada caso una masa final de 4.54 kg (masa de los tres cuarteos: 13.62 kg). Las masas finales de composta madura y residuos de grano de café se emplearon para el montaje de los tratamientos y su caracterización inicial.

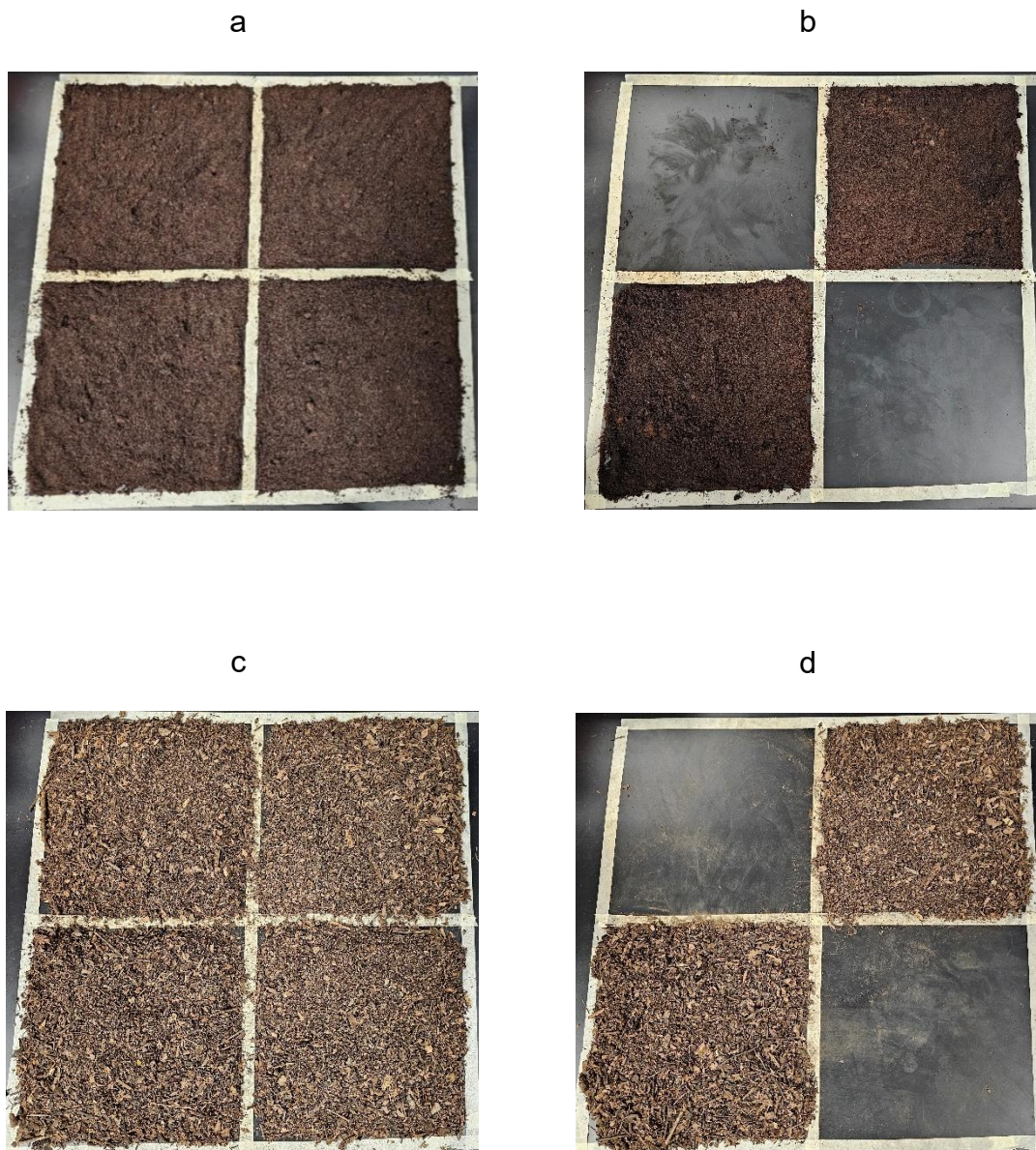


Figura 6-4. Método de cuarteo de los residuos de café en grano ("a" y "b") y de la composta madura ("c" y "d")

En esta etapa del proyecto, también se determinó el peso volumétrico por triplicado tanto de los residuos de café como de la composta madura (por separado), con el objetivo de conocer la relación entre el peso y el volumen de ambos materiales. Esta determinación se realizó en base a la norma NMX-AA-019-1985. La cual consistió en agregar el material a un recipiente de plástico cuyo peso vacío (kg) y volumen (m^3) eran conocidos. Una vez añadida la muestra, el recipiente se dejó caer sobre

una base fija y solida tres veces, dejándolo caer a una altura considerable, después se agregó más material hasta que el recipiente quedará lleno hasta el ras, sin presionar, posteriormente se procedió a pesar el recipiente y se registró el valor obtenido. Finalmente, se realizaron los cálculos para cada uno de los triplicados tanto de los residuos de café como de la composta madura (Ecuación 6-1).

$$PV = \frac{M_{TR}-M_T}{V_T} \quad \rightarrow \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Donde:

PV: peso volumétrico (Kg/m³)

M_{TR}: masa del recipiente con residuos (kg)

M_T: masa del tambo vacío (kg)

V: volumen real del tambo (m³)

6.3 Montaje de los tratamientos

Durante la primera semana del trimestre, se realizó el vaciado de los estómagos de las lombrices durante dos días (30 y 31 de julio del 2024). Se seleccionaron un total de 200 lombrices adultas, las cuales se colocaron dentro de una caja de plástico sin alimento, sobre papel absorbente humedecido para evitar que se secaran y murieran (Figura 6-5). Cada 12 h, se destapó la caja para proporcionarles la aireación necesaria.



Figura 6-5. Vaciado de los estómagos de las lombrices

El montaje de la lombricomposta se realizó el miércoles 31 de julio del 2024, se utilizaron cajas de plástico negras con tapa y una capacidad de 7,956 cm³ (17 cm de altura, 18 cm de ancho y 26 cm de largo), se le realizaron alrededor de 9 orificios a cada una de las cajas para permitir la entrada de oxígeno. Se aplicaron diferentes tratamientos y un control, cada uno con proporciones diferentes de composta madura (donada por la planta piloto de composta de la UAM-A) y de residuos de café en grano (Tabla 6-1).

Tabla 6-1. Composición de la composta y residuos de café según el tipo de tratamiento

Tratamiento / Composición	% de composta madura	% de residuos de café de grano
Tratamiento 1	50	50
Tratamiento 2	70	30
Tratamiento 3	90	10
Control	100	-

En esta etapa del proyecto se determinó la masa de composta que podía contener cada caja. Con base en ese dato se calculó la cantidad necesaria de composta y residuos de café para cada uno de los tratamientos, según la composición propuesta (Figura 6-6). A continuación, se presentan las masas requeridas:

- a) Tratamiento 1: 0.700 kg de composta y 0.700 kg de café
- b) Tratamiento 2: 0.980 kg de composta y 0.420 kg de café
- c) Tratamiento 3: 1.260 kg de composta y 0.140 kg de café
- d) Control: 1.400 kg de composta



Figura 6-6. Pesajes de las proporciones correspondientes

Antes de añadir los residuos de café se humedeció la composta madura, se aplicó la prueba de puño para verificar que la humedad fuera la adecuada. Posteriormente, se mezcló la composta con los residuos de café de grano hasta homogenizar.

Cada tratamiento se realizó por triplicado (Figura 6-7), teniendo un total de 12 cajas. A cada una de ellas se le introdujeron 14 lombrices adultas. Además, cada quince días, se agregaban entre 250 a 300 g de residuos de fruta a las cajas correspondientes al “control”, con el fin de proporcionar alimento necesario para las lombrices y que no se escaparan (Figura 6-8).



Figura 6-7. Vista frontal de los tratamientos montados



Figura 6-8. Vista superior de los tratamientos montados

6.4 Caracterización de los sustratos y de la lombricomposta

Se realizó la caracterización inicial, por separado, de los residuos de grano de café y de composta madura, los parámetros analizados fueron: materia orgánica, humedad, pH, conductividad eléctrica y macronutrientes. Para la caracterización al término del proceso, además de los parámetros anteriores también se determinaron el nitrógeno total y la relación C/N, los cuales están señalados en la norma NMX-AA-180-SCFI-2018 (SE, 2018). En la Tabla 6-2 se presenta la información.

Tabla 6-2. Métodos utilizados para la caracterización de cada uno de los parámetros

Parámetro	Método	Norma	Referencia
Materia orgánica	Calcinación	NMX-AA-021-1985	(SECOFI, 1985b)
Nitrógeno total	Destilación Kjeldahl	NMX-AA-024-1984	(SECOFI, 1984c)
Relación C/N	A partir de materia orgánica y nitrógeno total	NMX-AA-067-1985	(SECOFI, 1985c)
Humedad	Gravimétrico	NMX-AA-16-1984	(SECOFI, 1984a)
pH	Potenciométrico	NMX-AA-025-1984	(SECOFI, 1984b)
Conductividad eléctrica	Extracto de pH	NMX-AA-025-1984	(SECOFI, 1984b)
Macronutrientes NPK	Kit Hanna	No aplica	(Hanna Instruments, 2024)

Para la determinación de materia orgánica y macronutrientes, se utilizaron muestras secas de cada una de las lombricompostas y los controles, para ello se determinó la cantidad de muestra húmeda necesaria para los tres parámetros a evaluar considerando que al secarse disminuye la masa de las muestras. Se pesaron en charolas de aluminio 25 g de cada uno de los tratamientos y de los controles, y se sometieron a calentamiento dentro de la estufa a 100 °C durante 72 h. Posteriormente se realizó el procedimiento correspondiente para cada uno de los parámetros a determinar.

Materia orgánica

Su principio se basa en el porcentaje de materia orgánica (MO) determinada mediante la calcinación de las muestras a una temperatura de 650 °C. Para la realización de esta determinación se utilizó una muestra por tratamiento y control, secadas previamente (12 muestras en total). Se lavaron los crisoles y se secaron en la estufa a 100 °C durante 1 h. Transcurrido ese tiempo se colocaron los crisoles en el desecador durante 20 min, posteriormente se pesaron y se volvieron a introducir en la estufa a 100 °C por 1 h para después pesarlos nuevamente y así obtener el peso constante de cada crisol (diferencia de 0.001 g), una vez obtenido el peso constante se registraron como el peso del crisol vacío (SECOFI, 1985b).

Posteriormente, se les agregó a los crisoles 2 g de las muestras secas, y se sometieron a calcinación en la mufla a 650 °C durante 2 h (Figura 6-9), transcurrido este tiempo se apagó la mufla y se dejó enfriar por 2 h (SECOFI, 1985b).



Figura 6-9. Muestras sometidas a calcinación en mufla a 650 °C

Finalmente se pesaron los crisoles con las muestras calcinadas y se registraron estos valores como el peso del crisol con la muestra calcinada. Se realizó el cálculo de porcentaje de materia orgánica para todos los tratamientos utilizando la Ecuación 6-2 (SECOFI, 1985b).

$$MO = \left(1 - \frac{C_3 - C_1}{C_2 - C_1}\right) * 100 \quad \rightarrow \quad \textbf{Ecuación 6-2}$$

Donde:

MO: porcentaje de materia orgánica en base seca (%)

C₁: masa del crisol vacío (g)

C₂: masa del crisol más la muestra seca (g)

C₃: masa del crisol más la muestra calcinada (g)

Nitrógeno total

El principio de esta técnica se basa en la cuantificación del nitrógeno amoniacal y el nitrógeno orgánico presentes en la muestra, los cuales se consideran en conjunto como nitrógeno Kjeldahl. El método consta de dos etapas de digestión: en la primera, los nitritos y nitratos se transforman en amoníaco, y en la segunda, se descompone completamente la materia orgánica. Posteriormente, se lleva a cabo la destilación del amoníaco, y se realiza la titulación con un ácido de normalidad conocida. A continuación, se detalla el procedimiento realizado para la determinación de nitrógeno total (SECOFI, 1984c).

Se pesaron 0.25 g de muestra previamente seca. La muestra se transfirió cuidadosamente a un matraz Kjeldahl. En una campana de extracción, se añadieron aproximadamente 2 g de la mezcla de catalizadores y 5 mL de ácido sulfúrico concentrado, se agitó suavemente la mezcla hasta que los reactivos se combinaron por completo. La digestión se llevó a cabo en un equipo de microdigestión Kjeldahl aplicando primero calor moderado para evitar la formación de espuma. Posteriormente, se aumentó la intensidad del calor hasta que el contenido del

matraz se aclaró, tomando un color verde claro. Al concluir la digestión, se dejó enfriar el matraz completamente (SECOFI, 1984c).

Para la destilación del amoníaco, una vez que el matraz Kjeldahl estuvo completamente frío, se añadieron lentamente 45 mL de agua destilada, cuidando la posible generación de calor y reacciones violentas. La mezcla se transfirió al tubo de destilación y se colocó en el equipo destilador (Figura 6-10), asegurándose de que la puerta del equipo estuviera bien cerrada. Se preparó un matraz Erlenmeyer de 250 mL con 15 mL de ácido bórico y 3 gotas de un indicador, y se colocó para recibir el amoníaco destilado. La punta del destilador se sumergió en el ácido bórico para asegurar la captura correcta del amoníaco. Después, se inició el proceso de destilación, que tuvo una duración de cinco minutos, durante los cuales se añadió automáticamente 35 mL de NaOH al 30 %. Finalizada la destilación, se retiró el matraz Erlenmeyer del equipo (SECOFI, 1984c).



Figura 6-10. Equipo destilador Kjeldahl

Finalmente, se tituló el destilado con ácido sulfúrico 0.05 N hasta que el color verde cambió a rojo o púrpura, lo que marcó el punto final de la titulación. Los mililitros gastados en el proceso fueron registrados cuidadosamente, y se realizaron los cálculos necesarios para determinar la cantidad de nitrógeno presente en la muestra utilizando la Ecuación 6-3 (SECOFI, 1984c).

$$N_T = \frac{(A-B)*N*0.014}{M} * 100 \quad \rightarrow \quad \text{Ecuación 6-3}$$

Donde:

N_T : porcentaje de nitrógeno total en la muestra (%)

A: volumen de ácido sulfúrico empleado en la titulación de la muestra (ml)

B: volumen de ácido sulfúrico empleado en la titulación del blanco (ml)

N: normalidad del ácido sulfúrico

M: masa de la muestra

Relación C/N

Se realizó el cálculo correspondiente en función de los porcentajes masicos de carbono y nitrógeno total determinados anteriormente. Para determinar el contenido de carbono se multiplicó el porcentaje de materia orgánica por la constante de Jackson (0.58). A continuación, se muestra el cálculo de la relación C/N en la Ecuación 6-4 (SECOFI, 1985c).

$$\frac{C}{N} = \frac{MO*0.58}{N_T} \quad \rightarrow \quad \text{Ecuación 6-4}$$

Donde:

C/N: relación carbono/nitrógeno (%)

MO: porcentaje de materia orgánica en base seca (g)

N_T : porcentaje de nitrógeno total (%)

Macronutrientes

El principio se desarrolla cualitativamente, consiste en que los macronutrientes reaccionan formando complejos colorimétricos, la intensidad del color es proporcional a la presencia del elemento analizado (Figura 6-11). Para esta determinación se utilizó el Kit Hanna Instruments 3896. En la caracterización final

se mezclaron los triplicados de cada tratamiento y control, es decir, se obtuvo una muestra compuesta por cada tratamiento y control (4 muestras compuestas en total), posteriormente se realizó la determinación de macronutrientes en cada una de las muestras como se explica a continuación.

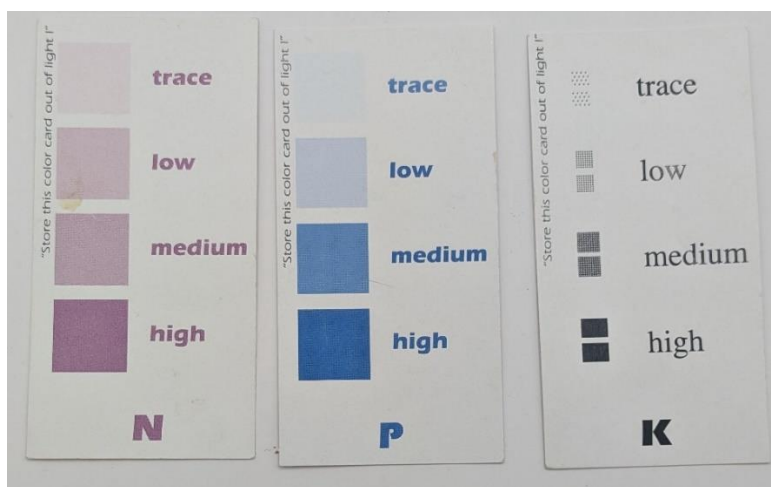


Figura 6-11. Cartas que indican colorimétricamente la concentración de los macronutrientes

Primero se preparó la “solución patrón” que fue utilizada para la determinación de nitrógeno, fosforo y potasio. Se agregó en un tubo de ensaye 9 cucharaditas (proveniente del kit Hanna) de las muestras (composta, residuos de grano de café lo lombricomposta, según fuera el caso), se añadieron 7.5 ml de la solución extractora HI 3896EX-0, se colocó la tapa del tubo y se agitó durante 1 min. Finalmente, se mantuvo en reposo durante 5 min (Hanna Instruments, n.d.).

- Nitrógeno. Después del tiempo de reposo de la solución patrón, se tomaron 2.5 ml del sobrenadante y se transfirieron a un nuevo tubo de ensayo. A continuación, se añadió el sobre del reactivo HI 3896N-0. Posteriormente, se tapó el tubo y se agitó durante 30 seg, dejándolo reposar otros 30 seg. Finalmente, se comparó el color de la muestra con la carta de color de nitrógeno y se registró el nivel de concentración observado (Hanna Instruments, n.d.).

- Fósforo. Se tomaron cuidadosamente 2.5 ml del líquido sobrenadante de la solución patrón y se transfirieron a un segundo tubo de ensaye, después se añadió el sobre con el reactivo HI 3896P-0, se tapó y agitó durante 30 seg, por último, se comparó el color de la muestra contra la carta de color correspondiente al fósforo. Se registro el contenido de fósforo determinado (Hanna Instruments, n.d.).
- Potasio. Se tomaron 0.5 ml de la solución patrón, se colocaron en otro tubo y se adicionaron 2 ml de la solución extractora HI 3896EX-0, después se añadió el sobre de reactivo HI3896K-0. Finalmente, se agitó por 30 s y observó la cantidad de sólidos precipitados formados en las muestras contra la carta correspondiente al potasio. Se registro la cantidad de potasio encontrada (Hanna Instruments, n.d.).

Humedad

El método empleado fue gravimétrico y se basa en la pérdida agua de la muestra cuando esta es sometida a secado. Para esta determinación se aseguró que las charolas tuvieran un peso constante, para ello se pesaron las charolas previamente etiquetadas y se registró la masa obtenida, después se colocaron dentro de la estufa a 120 °C durante 2 h, transcurrido ese tiempo se sacaron de la estufa y se dejaron enfriar por 1 h en el desecador, luego se volvieron a pesar; se repitió este procedimiento hasta obtener el peso constante de las charolas (variabilidad de 0.001 g) (SECOFI, 1984a).

Una vez que se logró el peso constante de las charolas, se pesaron 10 g de muestra de cada tratamiento y control y se agregaron a las charolas correspondientes, se sometieron a calentamiento dentro de la estufa a 100 °C durante 24 h, pasado este tiempo se sacaron y dejaron enfriar durante 1 h en el desecador. Posteriormente se pesaron y se registró la masa contenida en cada charola; se introdujeron nuevamente a la estufa a 100 °C durante 2 h, se dejaron enfriar en el desecador por 1 h y se volvieron a pesar, se repitió el procedimiento hasta obtener el peso

constante de las charolas con muestra. Finalmente, se realizó el cálculo utilizando la Ecuación 6-5 (SECOFI, 1984a).

$$H = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) * 100 \quad \rightarrow \quad \text{Ecuación 6-5}$$

Donde:

H: porcentaje de humedad (%)

M_i: masa de la muestra húmeda sin masa de la caja (g)

M_f: masa de la muestra seca sin masa de la caja (g)

pH y conductividad

El principio para determinar el pH se basa en la actividad de los iones hidrógeno presentes en una solución acuosa al 11 % de la muestra de lombricomposta. Para esta determinación se emplea un potenciómetro debidamente calibrado anteriormente. Tanto para el pH como para la conductividad eléctrica se utilizó el mismo procedimiento y las mismas muestras. Se pesaron 10 g de muestra y se mezclaron con 100 ml de agua desionizada (relación 1:10) durante 10 min. Se dejaron sedimentar los sólidos manteniendo la mezcla en reposo durante 30 min y finalmente, en el líquido sobrenadante se introdujo el conductímetro para determinar la conductividad eléctrica y después el potenciómetro para determinar el pH (SECOFI, 1984b).

6.5 Monitoreo del proceso

Para el monitoreo de los tratamientos, se midieron semanalmente la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica y la humedad, ya que son parámetros clave para evaluar si el proceso se desarrolla adecuadamente. A continuación, se explica el procedimiento realizado para cada parámetro.

- Temperatura. Fue el primer parámetro medido, ya que la manipulación durante las demás mediciones podría alterar sus valores. Para esta medición

se utilizó un termómetro digital (Figura 6-12). La temperatura se registró en tres puntos específicos de cada caja, como se muestra en la Figura 6-13.



Figura 6-12. Toma de temperatura con termómetro digital



Figura 6-13. Puntos específicos para registrar la temperatura

- pH. Se tomaron 10 g de muestra de cada tratamiento, mezclándose con 100 ml de agua desionizada (relación 1:10) durante 10 min. Posteriormente, se dejaron reposar durante 30 min para que los sólidos sedimentaran, permitiendo una lectura precisa del pH en el sobrenadante. La mezcla se

vertió cuidadosamente en probetas de 50 ml y la medición se realizó con un potenciómetro (Figura 6-14).



Figura 6-14. Determinación del pH de las muestras

- Conductividad eléctrica. Se midió utilizando el sobrenadante obtenido en la determinación del pH, con apoyo de un conductímetro digital (Figura 6-15).



Figura 6-15. Determinación de la conductividad eléctrica

- Humedad. Se realizó la prueba de puño, para ello se tomó un poco de lombricomposta y se compactó con la mano, el exceso de humedad se determinó cuando escurría mucho líquido, mientras que para el déficit de humedad esto ocurrió cuando al bajar la mano se desmoronaba la

lombricomposta. Cuando en algún tratamiento hubo déficit de humedad, estos se humedecieron con un volumen de entre 30 y 40 ml, la lombricomposta se mezcló hasta homogenizarla e incorporar completamente el agua añadida (Figura 6-16).



Figura 6-16. De demostración de la "prueba de puño" para determinación de humedad

6.6 Evaluación de la eficiencia de los tratamientos

Se realizó la prueba de fitotoxicidad para evaluar la eficiencia de cada uno de los tratamientos, esta consistió en determinar el índice de germinación IG para a su vez evaluar la madurez de cada tratamiento y del control. Se utilizó de una muestra por cada réplica de los tres tratamientos y el control (12 muestras en total) previamente secada en estufa a 90 °C durante 72 h.

El viernes 20 de septiembre se realizó el montaje de esta prueba, se pesaron por separado 5 g de muestra seca por tratamiento y control, se mezcló con 25 ml de agua desionizada (relación 1:5) durante 20 min. Luego se colocaron los filtros Whatman No.40 en cajas Petri, se distribuyeron 10 semillas en cada una de las cajas, y se añadió 4 ml de la solución (relación 1:5), se sellaron con Parafilm y se dejaron germinar a temperatura ambiente durante un periodo de 5 días, cabe

destacar que este procedimiento se realizó para dos tipos diferentes de semillas (lechuga y rábano).

Finalmente, se contaron el número de semillas germinadas y se determinó el porcentaje de germinación relativa (Ecuación 6-6). Además, se midió el largo de la retícula de las semillas que germinaron y se determinó el crecimiento de retícula relativa (Figura 6-7). Con los resultados obtenidos se realizó el cálculo de índice de germinación (Ecuación 6-8).

$$PGR = \frac{\text{Número de semillas germinadas en el extracto}}{\text{Número de semillas germinadas en el testigo}} * 100 \rightarrow \text{Ecuación 6-6}$$

$$CRR = \frac{\text{Elongación de radículas en el extracto}}{\text{Elongación de radículas en el testigo}} * 100 \rightarrow \text{Ecuación 6-7}$$

$$IG = \frac{(PGR * CRR)}{100} \rightarrow \text{Ecuación 6-8}$$

Donde:

IG: índice de germinación

PGR: porcentaje de germinación relativo

CRR: crecimiento de radícula relativo

En esta fase del proyecto, también se llevó a cabo el conteo tanto de lombrices adultas como las crías de las lombrices en cada una de las réplicas de los tratamientos y del control, además se contaron los cocones encontrados en cada uno de los tratamientos. Esto con el fin de evaluar la eficiencia de los tratamientos.

6.7 Recomendaciones

Finalmente se emitieron una serie de recomendaciones, esto fue con base en las respuestas que dio la encargada de la cafetería gourmet, al aplicarle el cuestionario, con el fin de solucionar problemas en cuanto a la gestión de los residuos de granos de café. También, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en el proyecto para emitir recomendaciones que favorezcan la eficiencia de los tratamientos para la degradación de los residuos de granos de café.

7. Análisis y discusión de resultados

En esta sección, se detallan los resultados obtenidos a lo largo de todo el proyecto desarrollado en el trimestre 24-P.

7.1 Generación de residuos de café

Durante la recolección realizada la primera semana del trimestre 24-P, se estimó que se generan 7.658 kg a la semana de residuos de café de grano en la cafetería gourmet de la UAM-A. Tal como se muestra en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. Generación en kg de residuos de granos de café en la UAM-A

Turno / Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Total por turno
Matutino	1.716	-	0.230	0.414	0.804	3.164
Vespertino	0.290	-	1.136	1.880	1.188	4.494
Total por día	2.006	-	1.366	2.294	1.992	7.658

Como se puede observar en la Tabla 7-1, el martes 16 de julio de 2024 no se generaron residuos de granos de café, porque se realizó el mantenimiento de la cafetera que se utiliza en la cafetería de barra fría de la unidad. También se observa que se generan más residuos en el turno vespertino en comparación al turno matutino, esto puede deberse a que en la mañana se brinda servicio de café en el desayuno subsidiado de la cafetería y por lo tanto no hay muchas ventas en la cafetería gourmet.

7.2 Caracterización inicial de los sustratos

Se realizó la caracterización inicial por separado de los residuos de grano de café y de la composta madura. El primer parámetro para caracterizar fue el peso volumétrico de los sustratos. Se determinó el peso volumétrico por triplicado tanto de los residuos de café como de la composta madura por separado utilizando la

Ecuación 6-1. Se obtuvo que el peso volumétrico promedio de los residuos de granos de café el cual fue de 514.622 kg/m³ y el de la composta madura que fue de 370.259 kg/m³. Esta variabilidad entre los pesos volumétricos de ambos materiales se debe a la cantidad de materia orgánica que contiene cada uno, entre más materia orgánica mayor será el peso volumétrico (Herrera et al., n.d.).

Además, comparando estos pesos volumétricos con los de otros residuos orgánicos (residuos de comida húmedos 540 kg/m³, residuos de jardín 101 kg/m³) (Sistemas integrados de gestión, n.d.), se puede deducir que la diferencia entre estos pesos se debe a dos factores. El primero la densidad aparente, ya que los residuos de café y la composta madura, por su estructura menos porosa tienden a ser más densos que los residuos de jardín, por lo tanto su peso volumétrico es mayor, y el segundo la humedad, los residuos de café y de comida húmeda suelen tener mayor humedad que la composta madura y los residuos de jardín, lo que contribuye a un peso volumétrico más alto (LCDRI, n.d.).

Después los parámetros caracterizados fueron humedad, pH, conductividad eléctrica y macronutrientes, todos ellos se realizaron por triplicado, a diferencia de macronutrientes que se realizó únicamente una determinación de residuos de café y otra de composta madura. Estas determinaciones se realizaron el mismo día del montaje de los tratamientos y del control (31 de julio de 2024). En las Tablas 7-2 y 7-3 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los parámetros.

Tabla 7-2. Resultados obtenidos en la caracterización inicial de los residuos de café

Muestras de café	Humedad (%)	pH	Conductividad eléctrica (µs/cm)	Macronutrientes	
1	54.79	5.71	630	Nitrógeno (N)	Trazas
2	54.85	5.67	656	Potasio (K)	Alto
3	54.78	5.66	658	Fosforo (P)	Alto
Promedio	54.80	5.68	648	No aplica	No aplica
Desviación estándar	0.039	0.027	15.620	No aplica	No aplica

Tabla 7-3. Resultados obtenidos en la caracterización inicial de la composta madura

Muestras Composta	Humedad (%)	pH	Conductividad eléctrica (µs/cm)	Macronutrientes	
1	32.81	8.90	482	Nitrógeno (N)	Trazas
2	30.47	8.81	446	Potasio (K)	Bajo
3	35.48	8.78	472	Fosforo (P)	Medio
Promedio	32.921	8.83	467	No aplica	No aplica
Desviación estándar	2.507	0.062	18.583	No aplica	No aplica

Al comparar los porcentajes de humedad entre las muestras de residuos de café de grano (Figura 7-1) y la composta madura (Figura 7-2), se observó que los residuos de café presentan un mayor porcentaje de humedad en relación con la composta. Este comportamiento puede explicarse por las características de cada material, el café al ser de origen vegetal se caracteriza por su capacidad de absorber y retener agua (Castellanos, 2020). Por otro lado, la composta al haber pasado por un proceso de descomposición, los microorganismos han degradado el material orgánico, eliminando gran cantidad del agua contenida en las etapas iniciales del proceso, además al haber estado almacenado durante cierto tiempo sin humedecerse, se pierde el contenido de humedad (Gipuzkoa, n.d.).

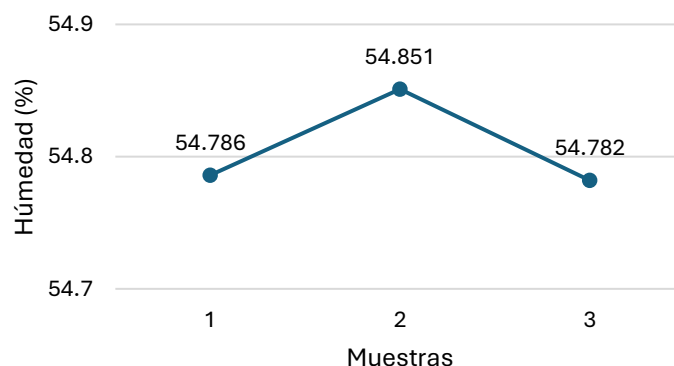


Figura 7-1. Porcentaje de humedad de los residuos de café de grano

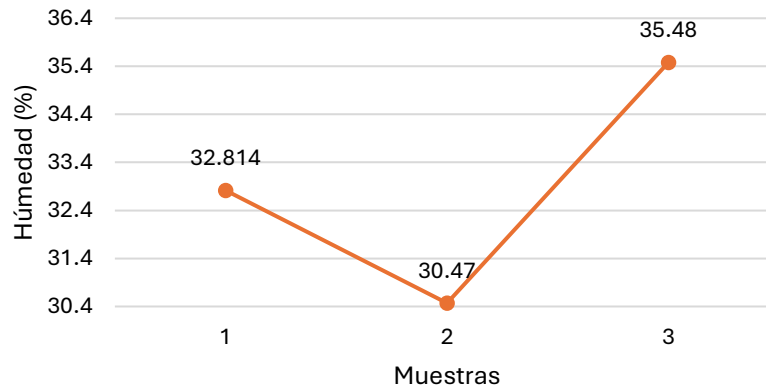


Figura 7-2. Porcentaje de humedad de la composta madura

Por otro lado, los resultados obtenidos indican que los residuos de café presentaron una mayor conductividad eléctrica en comparación a la composta madura (Figura 7-3). Esta diferencia de conductividad entre ambos materiales se debió a que la estructura seca de la composta dificultó la solubilización de minerales, obteniendo una menor conductividad. Por otro lado, los residuos de café, al contener mayor cantidad de compuestos solubles y encontrarse en una condición más fresca, se liberaron más iones, lo que indica una mayor conductividad eléctrica (Laboratorios A-L de México S.A. de C.V, n.d.).

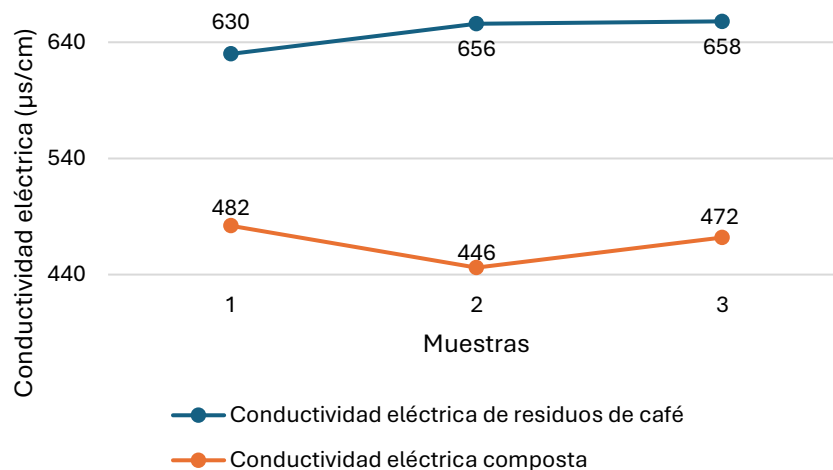


Figura 7-3. Conductividad eléctrica de la composta y de los residuos de café

En cuanto al pH obtenido, se observó una diferencia significativa entre los residuos de café y la composta madura. Los residuos de café de grano mostraron un pH ácido (Figura 7.4), en comparación con la composta que presentó un pH alcalino (Figura 7-5). Este comportamiento puede explicarse por la presencia de ácidos orgánicos, como el ácido cafeico y el ácido clorogénico presentes en los residuos de café (Marín & Puerta, 2008). En contraste con la composta madura, que presentó un pH básico debido a que previamente había pasado por un proceso de descomposición, este proceso permite neutralizar los compuestos ácidos introducidos en el composteo (Bueno et al., n.d.).

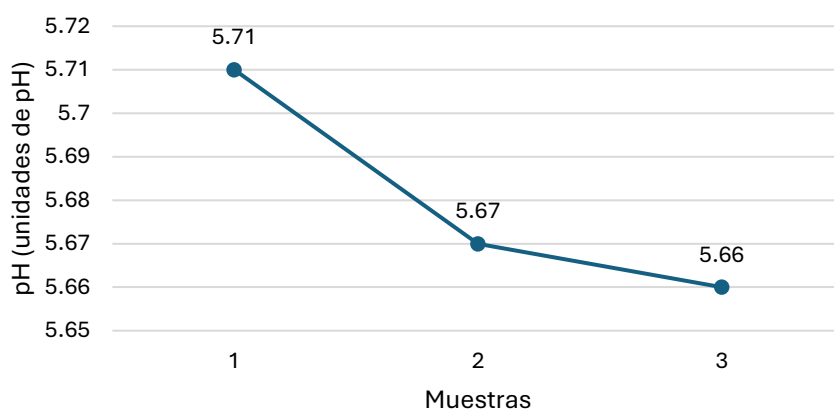


Figura 7-4. pH de los residuos de café de grano

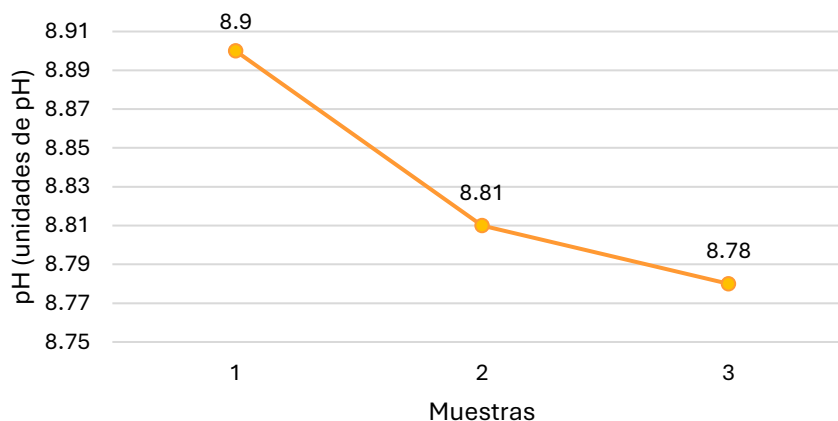


Figura 7-5. pH de la composta madura

En cuanto a los resultados obtenidos de los macronutrientes presentes tanto en los residuos de café como en la composta madura, se observó que ambos materiales contienen el mismo nivel de nitrógeno “trazas”. Por otro lado, en cuanto al contenido de potasio y fósforo se encontraron diferencias entre los residuos de café y composta madura.

Los niveles en “trazas” del nitrógeno tanto en los residuos de café (Figura 7.6) como en la composta madura (Figura 7-7), puede deberse a la volatilización del nitrógeno en forma de amoníaco. Además, en la composta madura, puede influir también que en el proceso de degradación se reducen los niveles de nitrógeno disponibles por la acción de los microorganismos, y por la evaporación de gases generados por las elevadas temperaturas a las que puede llegar el proceso de compostaje (González & Sadeghian, n.d.).



Figura 7-6. Nitrógeno presente en residuos de café



Figura 7-7. Nitrógeno presente en composta madura

El alto contenido de potasio y fósforo en los residuos de café se debe por su composición natural. El café se conoce por ser una fuente rica de estos nutrientes, especialmente el potasio, que se encuentra en grandes concentraciones dentro de los restos orgánicos (Gutiérrez et al., 2020). En la Figuras 7-8 y 7-10 se observa de forma cualitativa el alto contenido de potasio y fósforo respectivamente.

Por el contrario, la composta madura mostró niveles bajos de potasio (Figura 7-9) y medios de fósforo (Figura 7-11). Esto se debe a que, durante el proceso de descomposición, gran parte de estos nutrientes se liberan en forma gaseosa y se estabilizan en el ambiente (Khan academy, n.d.). Sin embargo, la composta madura sigue siendo una fuente importante de nutrientes, aunque la cantidad disponible resulta ser menor que en materiales frescos como los residuos de café.



Figura 7-8. Potasio presente en los residuos de café de grano

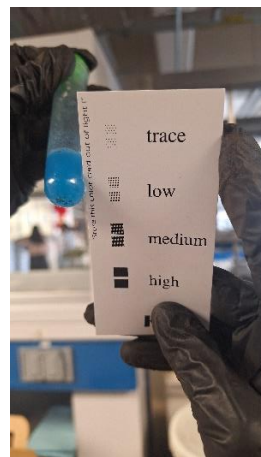


Figura 7-9. Potasio presente en la composta madura

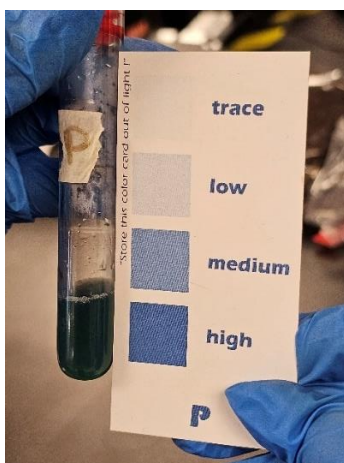


Figura 7-10. Fósforo presente en los residuos de café de grano



Figura 7-11. Fósforo presente en composta madura

Por último, los resultados de materia orgánica muestran una gran diferencia entre los residuos de café y la composta madura. Mientras que las muestras de composta madura presentan un promedio de 54.71 % de materia orgánica, los residuos de café superan por mucho esta cifra, con un promedio de 97.28 % (Tabla 7-4).

Tabla 7-4. Valores obtenidos para la determinación de materia orgánica

Datos		crisol vacío (g)	crisol más muestra seca (g)	crisol más muestra calcinada (g)	MO (%)	Promedio MO (%)	Desviación estándar
Café	1	36.3333	38.3425	36.3882	97.27	97.28	0.065
	2	31.5881	33.5913	31.6411	97.35		
	3	32.7213	34.7228	32.7768	97.23		
Composta	1	37.4910	39.5006	38.4120	54.17	54.71	1.046
	2	17.6863	19.6908	18.5699	55.92		
	3	37.7137	39.7146	38.6331	54.05		

Esta diferencia se debe al estado de descomposición de cada material. Los residuos de café, al ser un material fresco y rico en compuestos orgánicos como carbohidratos, lípidos, proteínas alcaloides, entre otros, presentaron un porcentaje mayor de materia orgánica (Figura 7-12) (Chávez, 2023). En cambio, la composta madura, la cual ya llevó un proceso de descomposición transformando la materia orgánica en CO₂, agua y minerales, presenta un menor porcentaje de materia orgánica (Figura 7-13) (Castillo et al., n.d.).

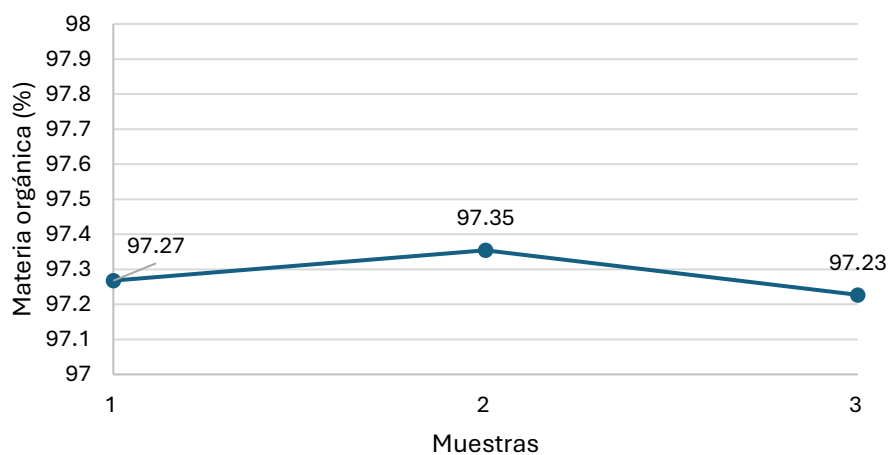


Figura 7-12. Variación de porcentaje de materia orgánica en los residuos de café

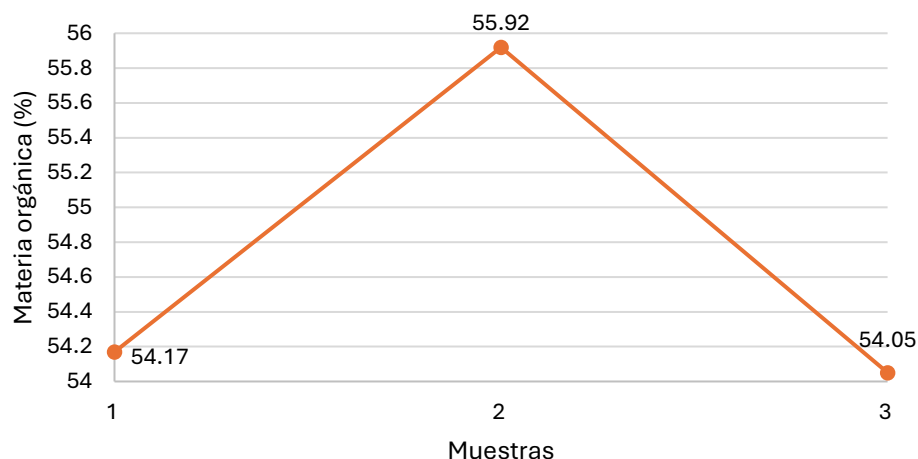


Figura 7-13. Variación de porcentaje de materia orgánica en la composta madura

7.3 Control del proceso en los tratamientos

El primer parámetro monitoreado fue la temperatura, la cual se registraba antes de analizar las determinaciones de pH, conductividad eléctrica y humedad. A lo largo del proceso de lombricomposteo, se mantuvieron las condiciones óptimas para el crecimiento, y desarrollo de las lombrices, que permitieron la descomposición eficiente de los residuos de café de grano.

A continuación, se presentan los datos obtenidos de la temperatura promedio de cada uno de los tratamientos realizados a lo largo del trimestre (Figura 7-14). Se observó la misma tendencia en cuanto a la disminución de la temperatura para los tratamientos “1”, “2” y “3”, mientras que el “control” se registró un aumento de temperatura cuando se añadían residuos orgánicos, debido a la actividad microbiana y de las lombrices al descomponer los residuos. Asimismo, se observa una disminución de temperatura conforme avanzaban las semanas, lo que se asume que ocurrió porque, a medida que los residuos de café se descomponían y estabilizaban, la actividad microbiana y de las lombrices disminuía.

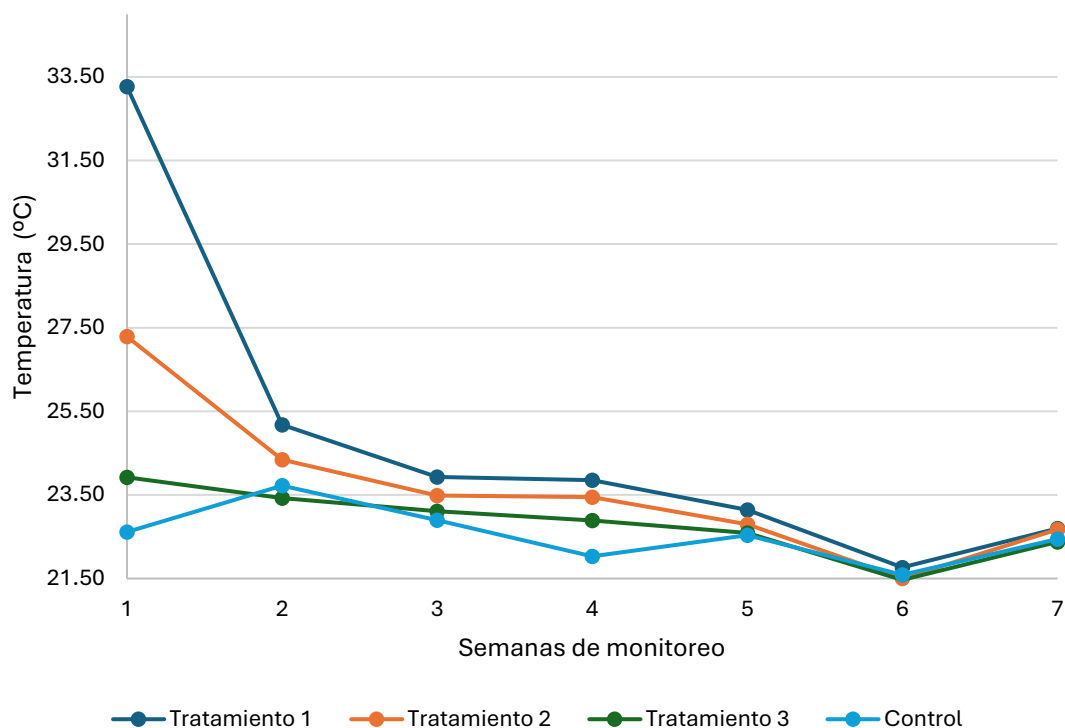


Figura 7-14. Variación de la temperatura promedio a lo largo del proceso de cada tratamiento

En las Figuras 7-15, 7-16 y 7-17, se observa con mayor claridad la variación de la temperatura según el tratamiento correspondiente. Se observó que en todos los tratamientos la temperatura inicial, durante la primera semana de monitoreo, fue mayor. Esto ocurrió debido a la adición de los residuos de café, lo que promovió una intensa actividad microbiana y de las lombrices, que comenzaron rápidamente a descomponer los residuos. También se puede visualizar como este aumento de temperatura varía según el tratamiento; es decir, se aprecia que, a mayor porcentaje de residuos de café presentes en las lombricompostas, mayor es la temperatura alcanzada. En el tratamiento 1, la temperatura llegó a 33.97 °C; en el tratamiento 2, alcanzó 27.43 °C; y en el tratamiento 3, la temperatura más elevada fue de 24.33 °C. Esta fase se asemeja a la fase termófila del compostaje tradicional, sin llegar a temperaturas tan elevadas, ya que podrían afectar el funcionamiento de las lombrices.

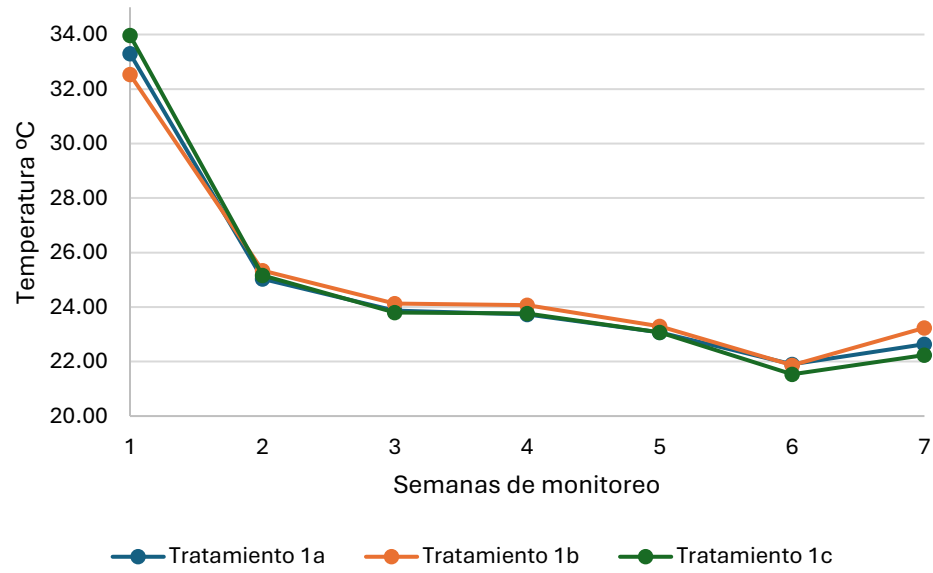


Figura 7-15. Variación de la temperatura del Tratamiento 1

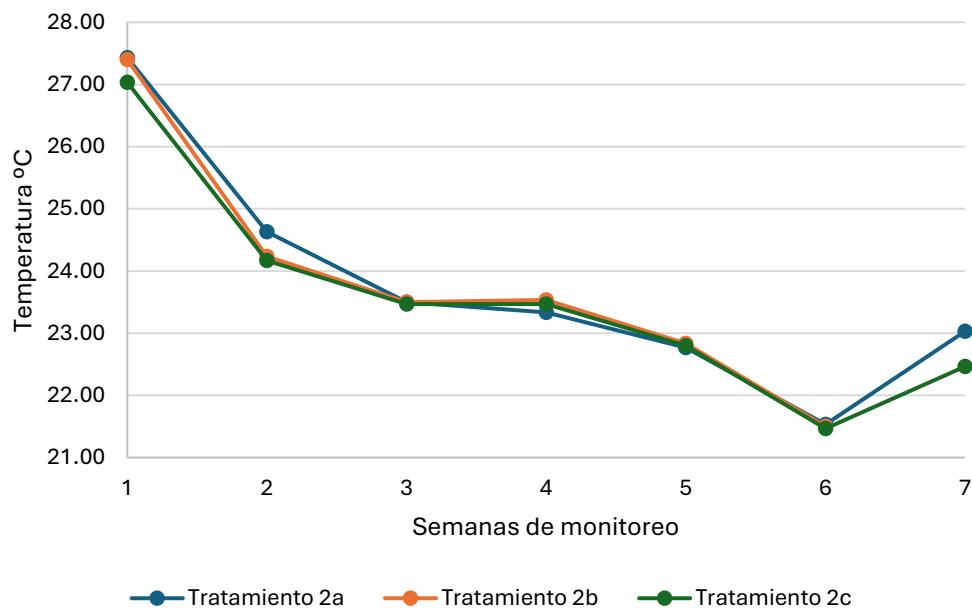


Figura 7-16. Variación de la temperatura del Tratamiento 2

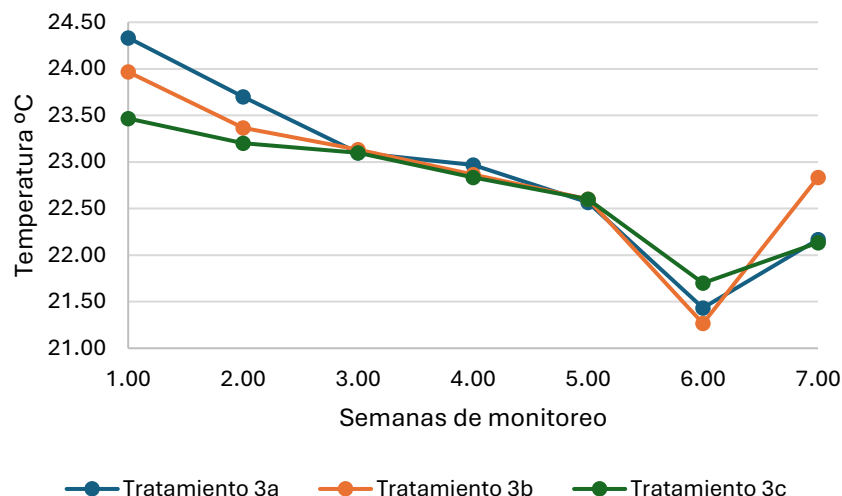


Figura 7-17. Variación de la temperatura del Tratamiento 3

Por el contrario, en el "control" (Figura 7-18) se observó una mayor variación de temperatura debido a la incorporación de una mayor cantidad de residuos orgánicos. Esto generaba incrementos en la temperatura, ya que estimulaba tanto la actividad de las lombrices como la de los microorganismos presentes. Sin embargo, se confirma el tratamiento adecuado de los tratamientos, porque se mantuvo el intervalo óptimo de temperatura (20 a 25 °C).

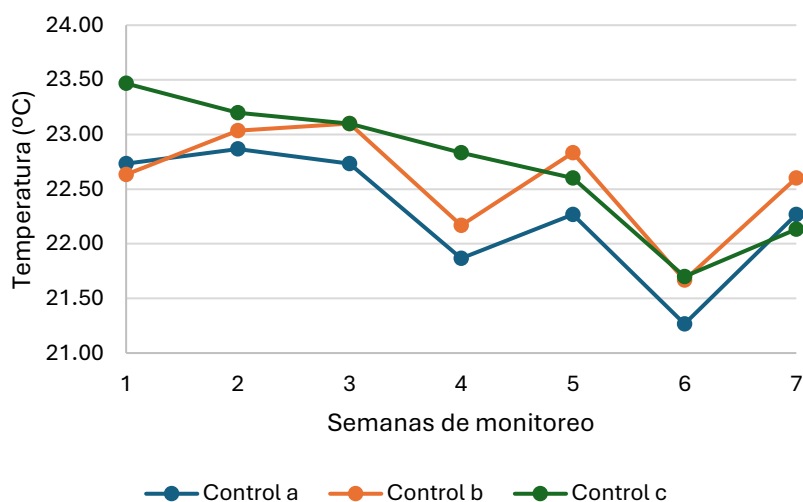


Figura 7-18. Variación de la temperatura del Tratamiento control

El pH de la lombricomposta es un factor clave que influye tanto en la disponibilidad de nutrientes como en el óptimo funcionamiento de las lombrices. El monitoreo realizado permitió identificar cuál de los tratamientos era más adecuado para la degradación de los residuos de café en grano.

De acuerdo con los datos de la Figura 7-19, se observó que el pH promedio de todos los tratamientos, incluido el control, tendió a alcalinizarse a medida que los residuos orgánicos se degradaban (residuos de café en los primeros tres tratamientos y residuos de fruta en el control). Este cambio se atribuye al proceso digestivo de las lombrices, que facilita la transformación de los residuos.

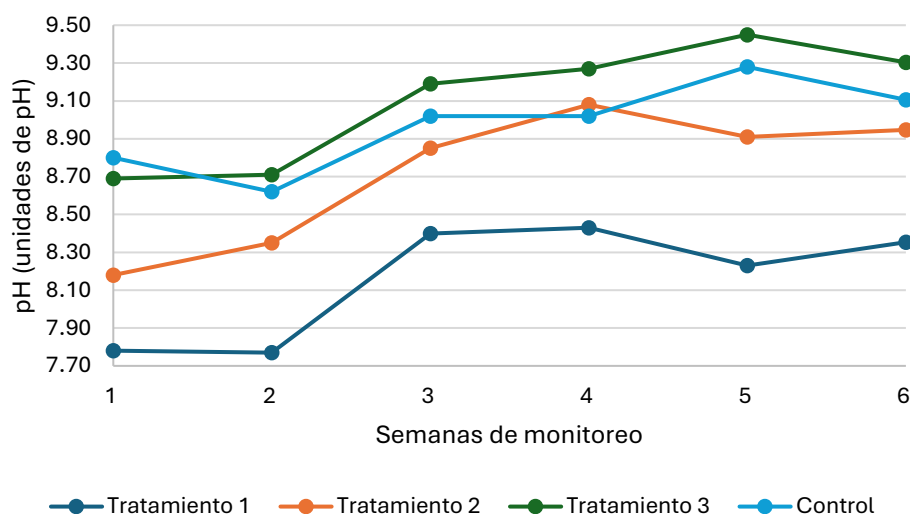


Figura 7-19. Variación de pH durante el monitoreo de los tratamientos

Los resultados sugieren que todos los tratamientos tienden a incrementar el pH de la lombricomposta, creando un entorno favorable para las lombrices. Sin embargo, los tratamientos más eficaces para la degradación de los residuos de café fueron el tratamiento 2 y el tratamiento 3, ya que ambos alcanzaron valores de pH similares a los del control. Este último, compuesto únicamente de composta y residuos de fruta, actúa como referencia en este estudio. Al compararlo con los demás tratamientos, se puede determinar cuál es el más efectivo.

Otro parámetro de interés monitoreado fue la conductividad eléctrica, el cual se evaluó en cada uno de los tratamientos con el fin de evaluar la influencia de los residuos de café. A pesar de que los residuos de café contienen una gran cantidad de nutrientes, el tratamiento control presentó niveles más altos de conductividad eléctrica lo que indica un alto contenido de sales solubles como nitratos, fosfatos, sulfatos, Ca^{2+} Y Mg^{2+} (Fertilizantes Orgánicos SAC, 2015). Se observó que los demás tratamientos aun no alcanzaron los niveles de descomposición que permiten la liberación de los iones solubles suficientes para su disponibilidad de nutrientes necesarios para el crecimiento de plantas (Bueno et al., n.d.). Sin embargo, los tratamientos siguen una tendencia muy similar (Figura 7-20), aunque podría favorecer más el tratamiento 3 por que presenta una conductividad más elevada, lo que permite un alto contenido de nutrientes en forma de sales solubles (Bueno et al., n.d.).

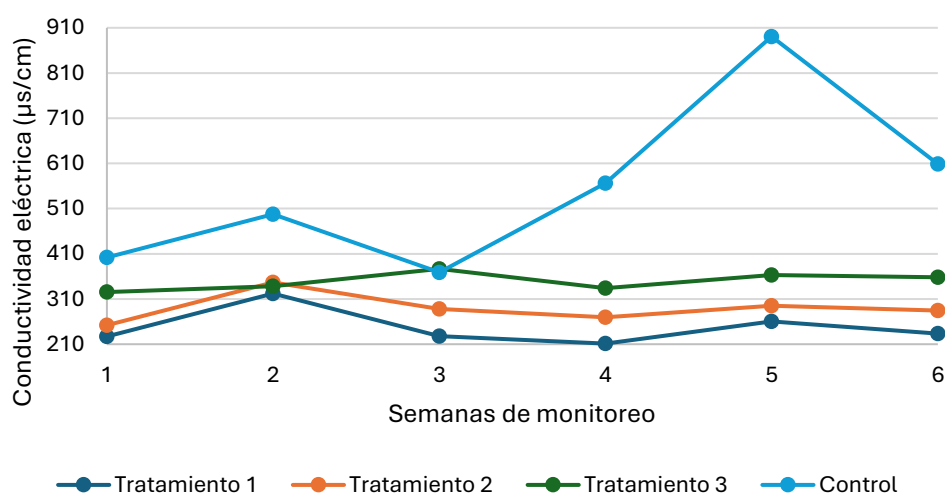


Figura 7-20. Variación de la conductividad eléctrica durante el monitoreo de los tratamientos

7.4 Caracterización final

Una vez finalizado el tratamiento se realizó la caracterización final de cada una de las lombricompostas y del control. Los parámetros para caracterizar fueron los mismos realizados en la caracterización inicial anexando nitrógeno total y relación C/N.

El primer parámetro caracterizado fue el porcentaje de humedad, en la Figura 7-21 se observa como el porcentaje de humedad varía entre cada tratamiento. En el tratamiento 1 se alcanza hasta un 59.78 % de humedad, mientras que en los tratamientos 2 y 3 llegan a un 55.64 % y 51.84 %, respectivamente. Esta diferencia entre cada tratamiento se debe a la proporción de residuos de café que contienen, es decir, a mayor cantidad de residuos de café mayor será el porcentaje de humedad, esto se debe a la capacidad que tienen los residuos de granos de café para retener agua, por su porosidad y estructura orgánica (Castellanos, 2020). Por otro lado, la composta madura, al haber estado almacenada sin humedad y por su descomposición previa, tiene una menor capacidad para retener agua debido a su estructura más densa y ser menos porosa que los residuos de café (Gipuzkoa, n.d.). En cuanto a los tratamientos “control” se observó un mayor porcentaje de humedad, esto ocurrió por que se le agregaban residuos orgánicos de fruta, tal como sandía y melón de los cuales los de la primera fruta tienen un alto contenido de humedad. En el caso del control a, durante todo el proceso de lombricomposteo se presentó un alto contenido de humedad, por que al inicio se le agregaron residuos de sandia, siendo una fruta con mayor humedad a diferencia de los residuos de melón los cuales se le adicionaron al control b y c.

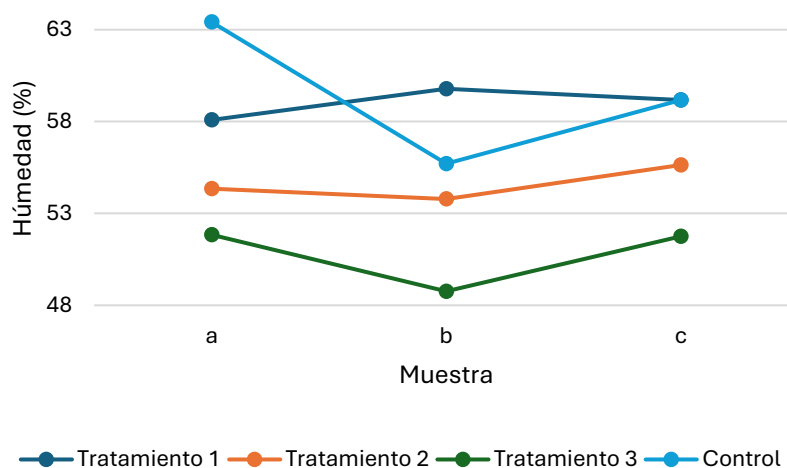


Figura 7-21 Variabilidad en el porcentaje de humedad de todos los tratamientos

En la Figura 7-22 se muestra el promedio del porcentaje de humedad para cada tratamiento y control, se observa la tendencia antes mencionada de como la cantidad de los residuos de café afecta el contenido de humedad presente en cada tratamiento. Mientras que el tratamiento 2 y 3 presentan un promedio de 54.59 % y 50.78 % de humedad respectivamente, el tratamiento 1 se acerca más al porcentaje óptimo de humedad siendo de 59.01 %, por lo que es el tratamiento que más se asemeja al comportamiento de la lombricomposta control además casi está dentro del intervalo de porcentaje de humedad óptimo (60 – 70 % de humedad) (CEDICAFÉ, 2023). En contraste a la norma NMX-FF-109-SCFI-2008, el porcentaje promedio de humedad de todos los tratamientos sobrepasa el porcentaje de humedad óptimo establecido por dicha norma (20 – 40 % de humedad), sin embargo, las lombrices no se vieron afectadas por esta diferencia, porque no excedieron por mucho el intervalo mencionado (Secretaría de Economía, 2008).

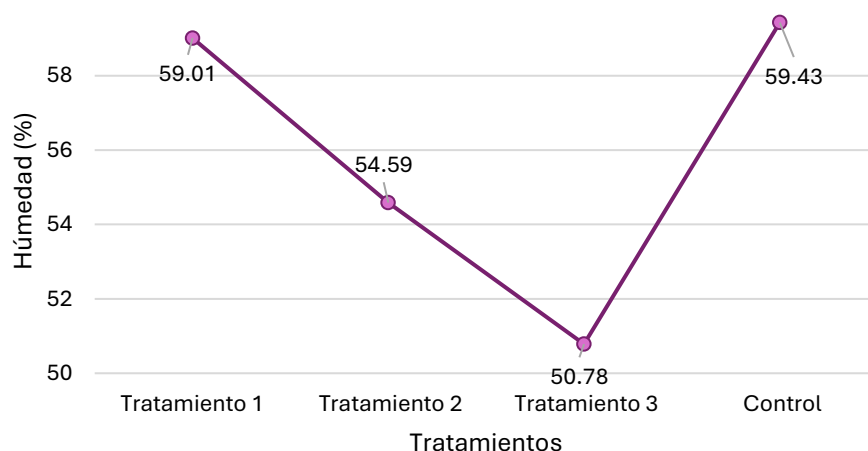


Figura 7-22. Humedad promedio para cada tratamiento y el control

Posteriormente, se determinaron los parámetros de materia orgánica, nitrógeno total y relación carbono/nitrógeno haciendo los cálculos correspondientes para cada parámetro (Ecuación 6-2, 6-3 y 6-4 respectivamente), para la determinación de estos parámetros se utilizó una muestra previamente secada y tamizada. En la Tabla 7-5 se presentan todos los resultados obtenidos de estos tres parámetros para cada uno de los tratamientos realizados.

Tabla 7-5. Valores obtenidos de materia orgánica, nitrógeno total y relación C/N

Tratamientos		Materia orgánica (%)	Nitrógeno total (%)	Relación C/N
1	a	31.99	1.84	10.08
	b	33.68	1.95	10.02
	c	32.23	1.86	10.05
2	a	50.69	1.89	15.56
	b	39.95	1.98	11.70
	c	40.55	1.99	11.82
3	a	45.74	2.63	10.09
	b	49.35	2.42	11.83
	c	50.34	2.29	12.75
Control	a	46.01	1.76	15.16
	b	50.16	1.58	18.41
	c	43.20	1.64	15.28

En la Figura 7-23 se presentan los valores de porcentaje de materia orgánica obtenidos en cada uno de los tratamientos por triplicado. Se observó una gran variabilidad entre las réplicas para los tratamientos 2, 3 y control, mientras que en el tratamiento 1 los valores son muy similares.

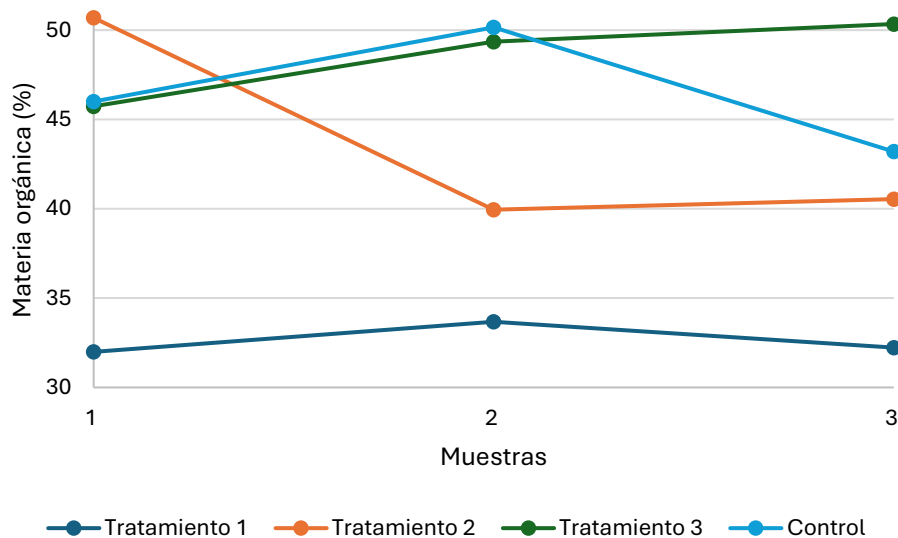


Figura 7-23. Variabilidad del porcentaje de materia orgánica entre las réplicas de cada tratamiento

En la Figura 7-24, se presenta el porcentaje promedio de materia orgánica para cada uno de los tratamientos y el control, se observó que estos porcentajes se encuentran dentro del rango óptimo el cual es de 30 a 60 % de MO (Gipuzkoa, n.d.). Por otro lado, comparando los resultados obtenidos con el intervalo óptimo del porcentaje de materia orgánica establecido por la norma NMX-FF-109-SCFI-2008, se observa que todos los tratamientos se mantienen dentro (20 a 50 % en base seca) (Secretaría de Economía, 2008). El tratamiento 1 se obtuvo un promedio de 32.63 % de MO lo que indica la adecuada descomposición de los residuos de café al disminuir al máximo estos residuos.

En los tratamientos 2 y 3 el porcentaje promedio de MO fue más elevado siendo estos de 43.73 y 48.48 %, respectivamente. Esto quizá se deba a que son tratamientos con mayor contenido de composta madura y a que la mayor cantidad de café se ha descompuesto, por lo que el porcentaje de materia orgánica obtenida en estos tratamientos corresponde en mayor medida a la materia orgánica contenida en la composta madura.

Finalmente, en el tratamiento control se obtuvo un porcentaje promedio de MO igual a 46.46 %, este valor se encuentra entre los datos obtenidos del tratamiento 2 y 3,

y al igual que ellos, contiene un mayor contenido de materia orgánica esto por la adicción de los residuos de fruta los cuales se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica.

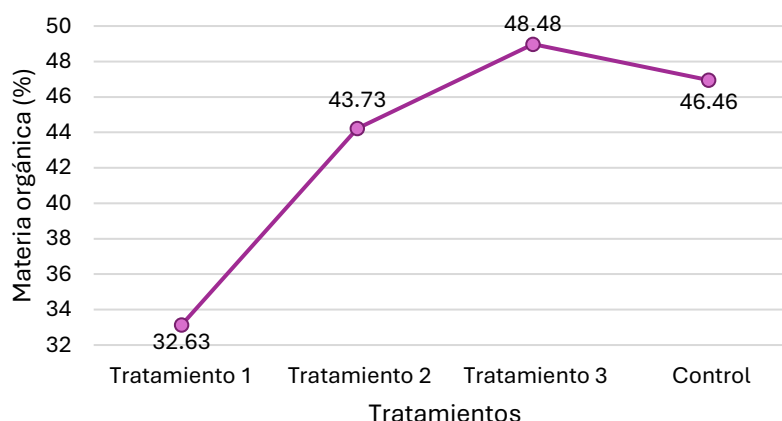


Figura 7-24. Porcentaje promedio de materia orgánica entre los tratamientos

En cuanto a nitrógeno total (Figura 7-25), se observó que a menor contenido de residuos de café el nitrógeno total aumenta. Esto sucedió por que la composta madura tras su descomposición previa tiene la capacidad de retener material orgánico, y no liberar gases como el amoníaco o el nitrógeno molecular, por lo que, al aumentar la proporción de composta se retuvo mayor cantidad de nitrógeno (CEDICAFÉ, 2023). Por otro lado, la pérdida de nitrógeno depende de los materiales utilizados al inicio, en este caso los residuos de café tienden a contener un alto contenido de nitrógeno el cual se pierde tras un periodo largo de maduración, además factores como la temperatura, el pH y la aeración excesiva pueden aumentar las pérdidas de nitrógeno (Tortosa, 2013).

Para el tratamiento control del lombricomposteo, los residuos de fruta poseen un alto contenido de nitrógeno, sin embargo este podría fugarse si existe un periodo largo de maduración de la lombricomposta, además de la aireación excesiva en estos tratamientos pueden acelerar la pérdida de nitrógeno (Tortosa, 2013).

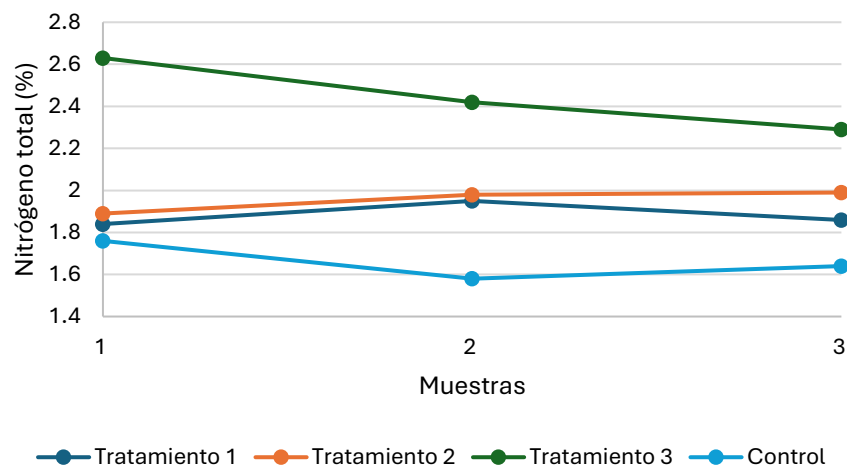


Figura 7-25. Variabilidad del nitrógeno total de los tratamientos

En la Figura 7-26, se presentan los promedios del porcentaje de nitrógeno total contenido en cada tratamiento y el control. En el tratamiento 1 se obtuvo 1.88 % de nitrógeno total, en el tratamiento 2 se reflejó un mayor contenido de nitrógeno total siendo este de 1.95 %, en el tratamiento 3 se observa un aumento de 2.45 % y finalmente el control es el que presento un menor contenido de nitrógeno total de 1.66 %.

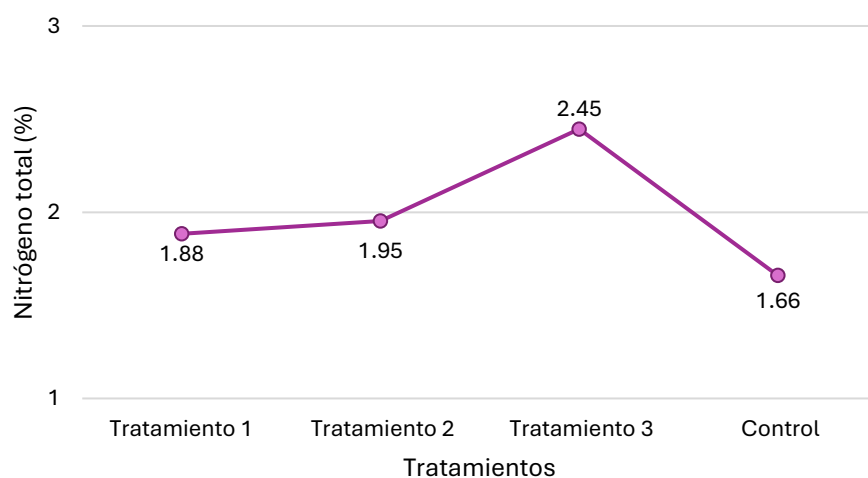


Figura 7-26. Promedio del porcentaje de nitrógeno total en todos los tratamientos

Relacionando la materia orgánica con el nitrógeno total se obtuvo la relación carbono/nitrógeno de cada uno de los tratamientos, los cuales se muestran en la Figura 7-27. Se observó una gran diferencia entre los triplicados de cada muestra con excepción del tratamiento 1, el cual presenta resultados similares entre sus réplicas.

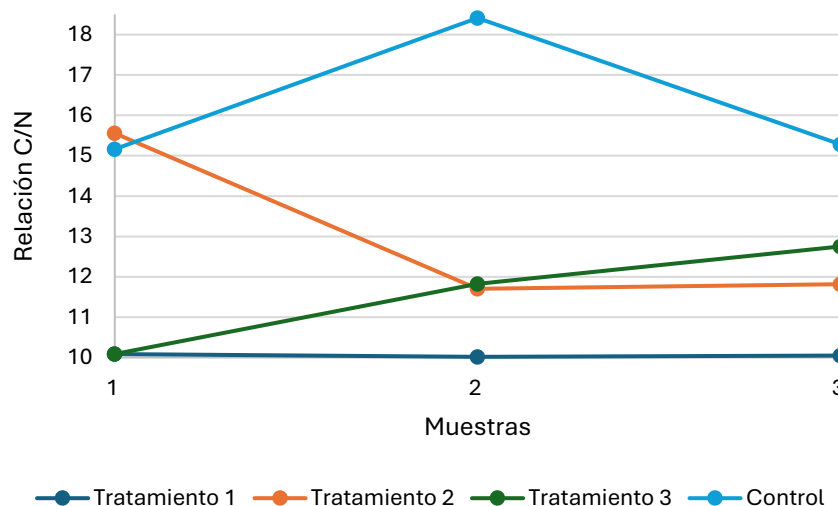


Figura 7-27. Variabilidad de la relación C/N de todos los tratamientos

En la Figura 7-28 se muestra el promedio entre los tratamientos respecto a la relación C/N. Se observó que todos los tratamientos presentan valores dentro del intervalo óptimo (relación 10:1 a 20:1) (Gipuzkoa, n.d.). Esto favorece la actividad microbiana y de las lombrices en el proceso de lombricomposteo. En comparación a la norma NMX-FF-109-SCFI-2008, se observó que la relación C/N de todos los tratamientos es favorable porque ninguno supera el límite establecido por dicha norma ($\leq 20:1$) (Secretaría de Economía, 2008).

En los tratamientos 1 y 3 se obtuvo una relación C/N promedio de 10.05 y 11.56 respectivamente, lo cual significa que la materia orgánica se mineralizó rápidamente en ambos casos, esto permite un equilibrio entre el carbono y nitrógeno presente en la lombricomposta, favoreciendo la descomposición acelerada de los residuos de

café (Laboratorios A-L de México S.A. de C.V, n.d.). En el tratamiento 2, la relación promedio de C/N fue superior siendo de 13.03, lo que indica una descomposición más lenta, sin embargo se encuentra dentro del rango optimo (10-20) (Garcia & Félix, 2014).

Por último, el tratamiento control, su relación C/N fue alta de 16.28, su descomposición resulta ser la más lenta entre los tratamientos, esta relación indica un exceso de carbono a diferencia del nitrógeno presente, lo que reduce la eficiencia del proceso de compostaje de dicho tratamiento (Garcia & Félix, 2014).

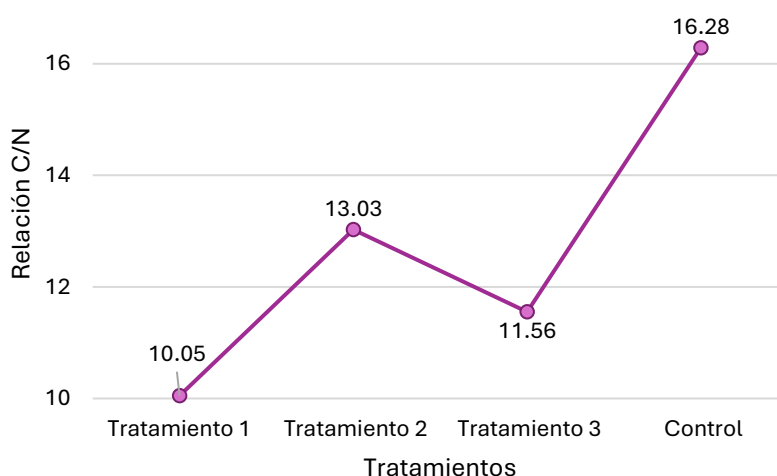


Figura 7-28. Promedio de la relación carbono/ nitrógeno entre los tratamientos

En el análisis de macronutrientes, para la determinación de nitrógeno se observó una similitud en los tratamientos 1 y 2 (Figura 7-27a y b, respectivamente), ambos presentaron una concentración mínima de nitrógeno categorizándose como “trazas”, debido quizá al exceso de aireación de los tratamientos. El tratamiento 3 (Figura 7-29c), presentó una concentración un poco más elevada de nitrógeno categorizándose como “bajo”, se observó que entre menor sea la cantidad de residuos de café aumenta el contenido de nitrógeno, la liberación de este nutriente. Por último, en el control (Figura 7-29d), se presentó un alto contenido de nitrógeno, esto ocurrió por la fácil y rápida descomposición de los residuos de fruta que

permiten un ambiente favorable para la liberación de nitrógeno (Laboratorios A-L de México S.A. de C.V, n.d.).

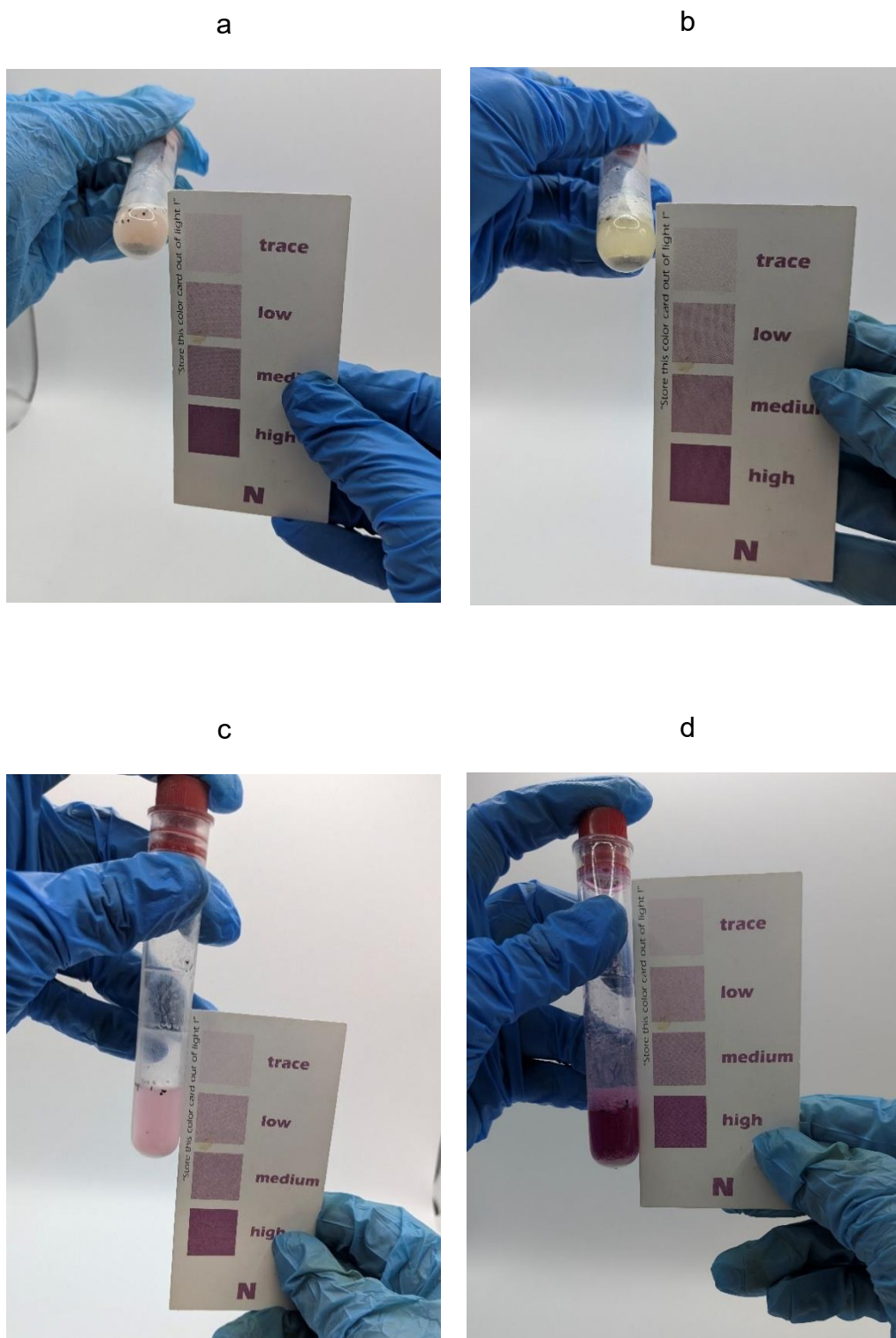


Figura 7-29. Nitrógeno presente en Tratamiento 1 “a”, Tratamiento 2 “b”, Tratamiento 3 “c” y Control “d”

En la determinación de fósforo (Figura 7-30), se obtuvo el mismo resultado para el tratamiento 1, 2 y 3 (Figura 7-30 “a”, “b” y “c” respectivamente), con una concentración “media”. Esta concentración moderada de fósforo sucede por su liberación en forma de minerales, a diferencia del nitrógeno, el fosforo se mantiene en el material compostado y no se pierde por el exceso de aireación (Du et al., 2018). Para el control (Figura 7-30 “d”), se observó una concentración “alta”, esto ocurrió por la presencia de residuos orgánicos de fruta, que aceleran la mineralización de la lombricomposta (Du et al., 2018).

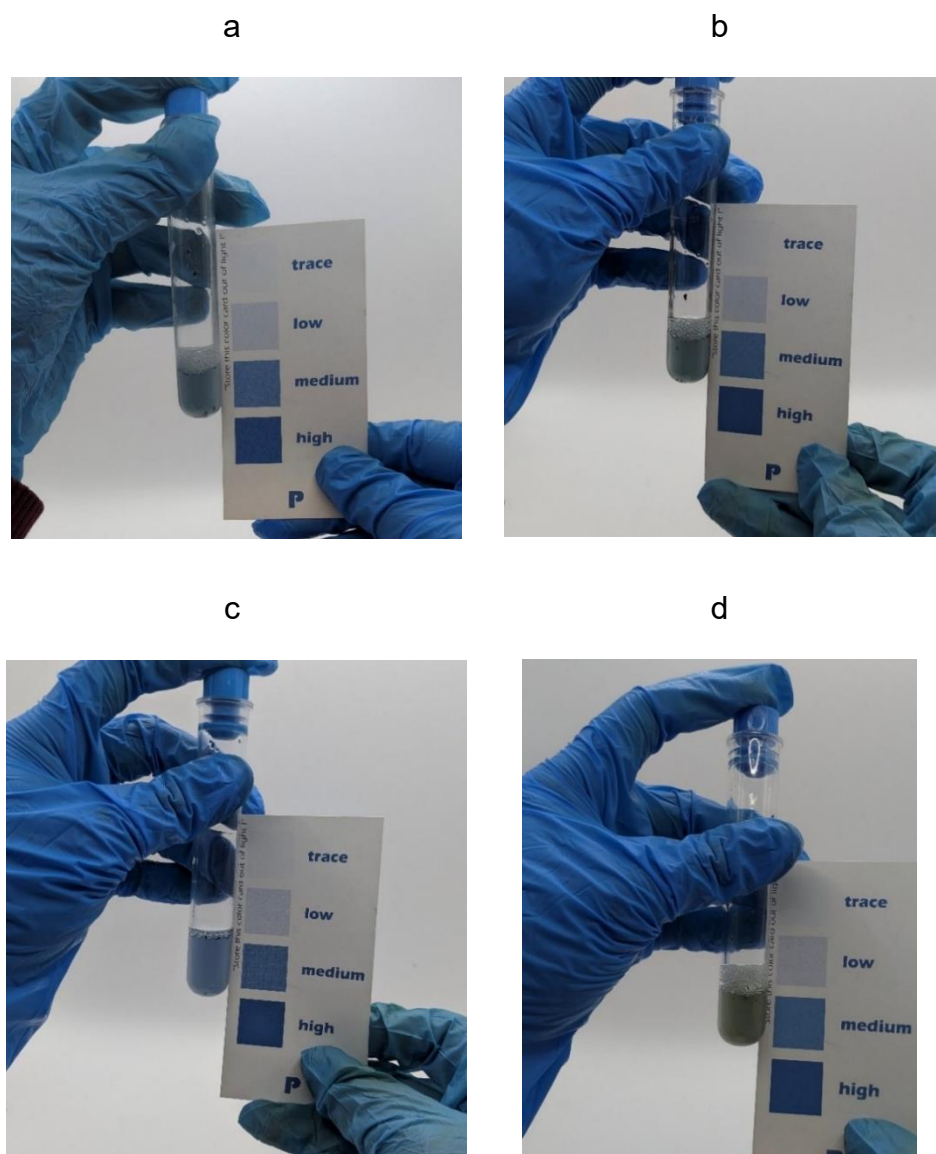


Figura 7-30. Fosforo presente en Tratamiento 1 “a”, Tratamiento 2 “b”, Tratamiento 3 “c” y Control “d”

Finalmente, en la determinación de potasio (Figura 7-31), se observó una similitud entre el tratamiento 1 y 2 ambos con una concentración “baja” de potasio (Figura 7-29a y b). Esto ocurrió por la descomposición de los residuos de café y su lenta liberación de potasio presente. Por otro lado, el tratamiento 3 (Figura 7-31c), mostró una concentración media de potasio, esto ocurrió porque la composta madura es la fuente principal que libera este nutriente, lo que favorece su concentración. Finalmente, en el tratamiento control (Figura 7-31d), se observó una mayor disminución de potasio, debido a que los residuos de fruta no son ricos en potasio y por lo tanto no aportan este nutriente (Castellanos, 2020).

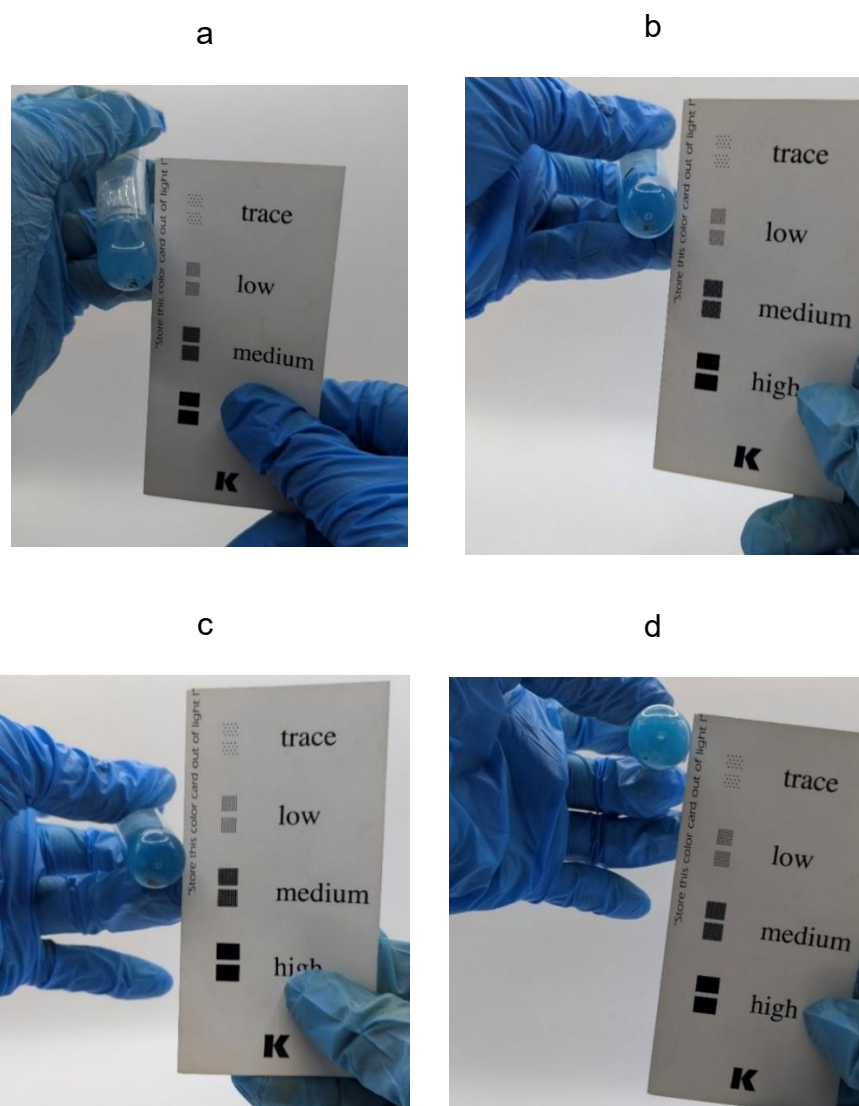


Figura 7-31. Potasio presente en Tratamiento 1 “a”, Tratamiento 2 “b”, Tratamiento 3 “c” y Control “d”

7.5 Eficiencia de los tratamientos

En la Tabla 7-6, se presentan los resultados obtenidos en la prueba de fitotoxicidad, se obtuvo el promedio de la elongación de retícula de las semillas germinadas en los triplicados de cada tratamiento. Posteriormente, se determinó el PGR y el CRR utilizando la Ecuación 6-6 y 6-7, respectivamente, finalmente, con los resultados obtenidos se determinó el IG mediante la aplicación de la Ecuación 6-8.

Durante el conteo de las semillas de rábano germinadas se observó que en el tratamiento 1 y 2 todas las semillas germinaron en cada uno de sus triplicados, lo que indica la eficiencia de ambos tratamientos. Por el contrario, en el tratamiento 3 germinaron el 90 % de las semillas y en el control el PGR fue de 6.67 %. También se encontraron dos semillas (una en el tratamiento 1 y otra en el tratamiento 3) que, si germinaron, sin embargo, no presentaron crecimiento en la retícula, esta se encontraba envuelta dentro de la semilla.

Tabla 7-6. Resultados obtenidos en la prueba de fitotoxicidad de todos los tratamientos

Tratamiento		Retícula (cm)	PGR (%)	CRR (%)	IG (%)
1	a	5.56	80.00	68.59	54.87
	b	6.19	90.00	67.26	60.53
	c	5.21	100.00	59.76	59.76
2	a	6.33	100.00	78.05	78.05
	b	7.80	100.00	84.78	84.78
	c	7.74	100.00	88.76	88.76
3	a	5.89	100.00	72.63	72.63
	b	6.62	100.00	71.96	71.96
	c	4.10	100.00	47.02	47.02
Control	a	6.40	80.00	78.91	63.13
	b	4.72	100.00	51.30	51.30
	c	4.18	80.00	47.88	38.30

En la Figura 7-32, se muestra gráficamente el comportamiento del crecimiento de retícula de cada uno de los tratamientos. Se observa mayor crecimiento de retícula en el tratamiento 2, seguido del tratamiento 3. El control es el tratamiento que presenta menos crecimiento.

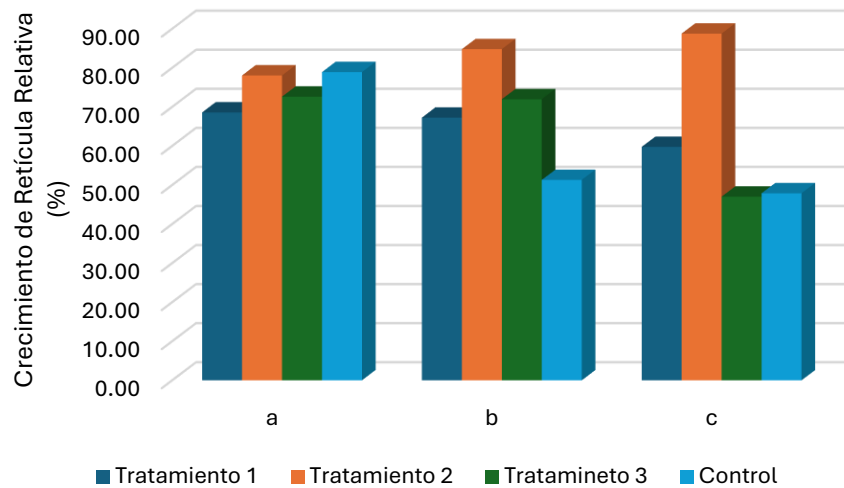


Figura 7-32. Comparación del crecimiento de retícula entre tratamientos

En la Figura 7-33, se muestra el promedio de CRR de todos los tratamientos. Se observó que el tratamiento 2 es el más eficiente, con un 83.87 % de crecimiento de retícula. Los tratamientos 1 y 3 presentan un comportamiento similar, con un CRR de 65.20 y 63.87 % respectivamente. Por último, el tratamiento control fue el menos efectivo, con un CRR de 59.37 %.

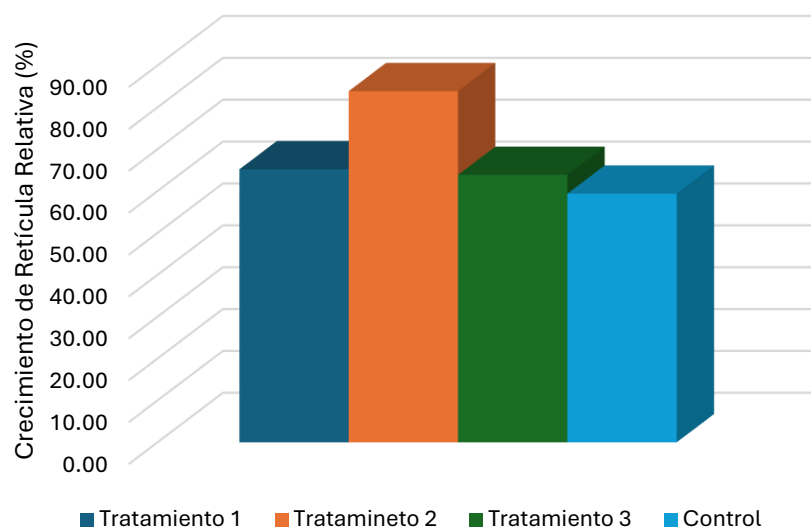


Figura 7-33. Crecimiento de retícula promedio de los tratamientos

En la Figura 7-34, se muestra gráficamente el comportamiento del índice de germinación obtenidos en todos los tratamientos. Se observó un mayor IG en los tratamientos 2 y 3, lo que indica la eficiencia de ambos tratamientos. Mientras que en el tratamiento 1 se observó mayor eficiencia en comparación al tratamiento control. Estos resultados indican que los residuos de café aportan nutrientes esenciales que permiten el crecimiento de plantas, resultan ser más efectivos que los residuos de fruta que contiene el tratamiento control.

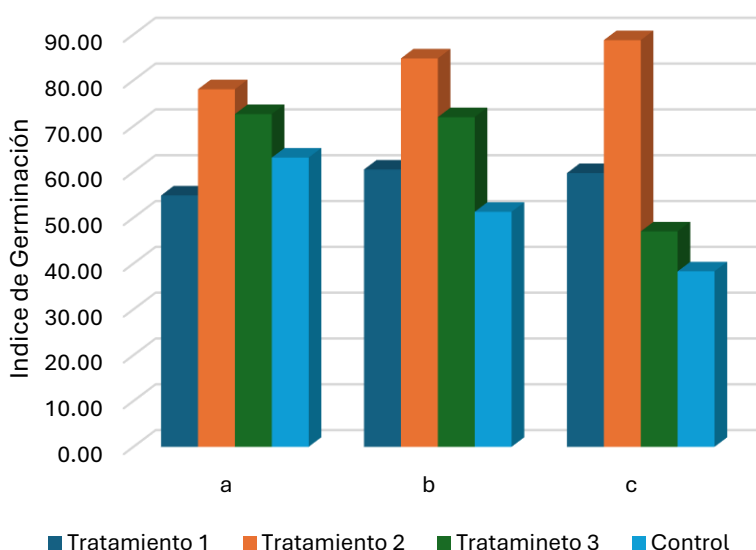


Figura 7-34. Comparación del índice de germinación entre todos los tratamientos

En la Figura 7-35 se observa el comportamiento del índice de germinación en promedio en cada uno de los tratamientos. Se observó un mayor índice de germinación en los tratamientos 2 y 3 (83.87 y 63.87 %, respectivamente). En el tratamiento 1 se obtuvo un 58.39 % de IG, lo que indica una menor eficiencia en comparación a los dos tratamientos antes mencionados, sin embargo, resultó ser más eficiente que el tratamiento control el cual obtuvo un IG de 50.91 %.

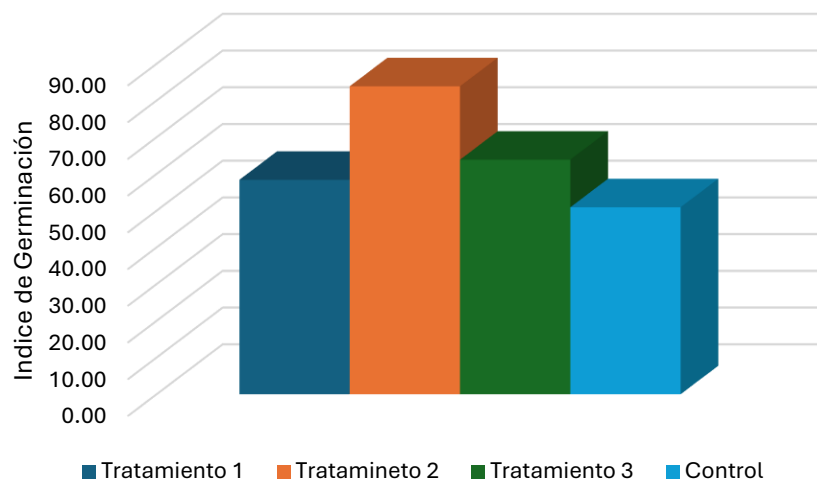


Figura 7-35. Índice de germinación promedio de los tratamientos

En la Tabla 7-7 se presentan los resultados promedios de todas las determinaciones realizadas en la prueba de fitotoxicidad para las semillas de rábano (Figura 7-36). Se puede observar la tendencia antes mencionada, siendo el tratamiento 2 el de mayor rendimiento en comparación con los otros tratamientos. Mientras que el tratamiento control es el que muestra la menor eficiencia para el crecimiento de plantas.

Tabla 7-7. Resultados promedios en la prueba de fitotoxicidad

Tratamiento	Retícula (cm)	PGR (%)	CRR (%)	IG (%)
1	5.65	90.00	65.20	58.68
2	7.29	100.00	83.87	83.87
3	5.54	100.00	63.87	63.87
Control	5.10	86.67	59.37	50.91

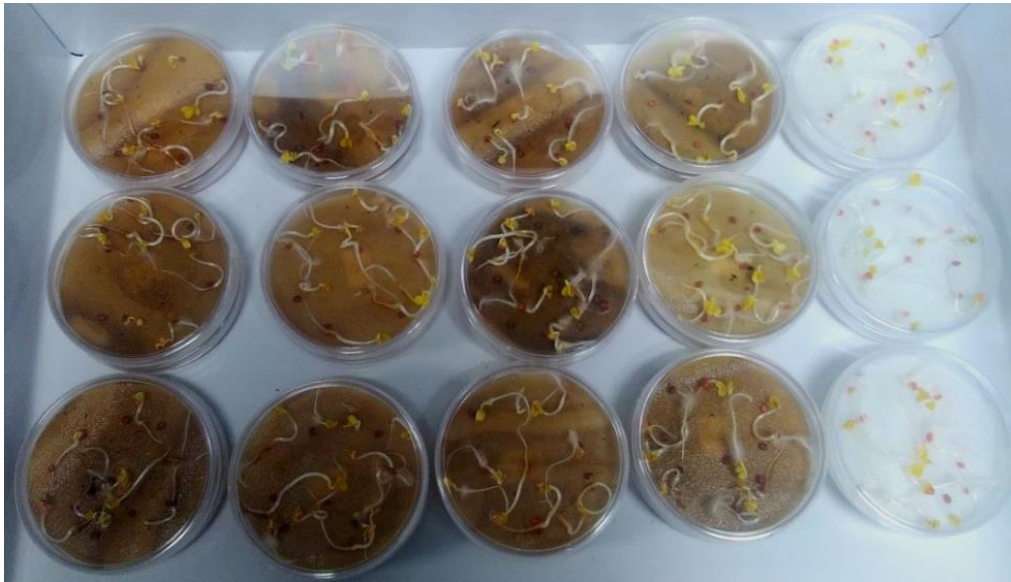


Figura 7-36. Pruebas de fitotoxicidad de semillas de rábano

Por otro lado, en la prueba de fitotoxicidad realizada con semillas de lechuga no se observó un gran porcentaje de germinación, a pesar de que las semillas se dejaron por 13 días, solo lograron germinar hasta dos semillas por tratamiento, incluso en los blancos solo germinaron 3 semillas de las 30 sembradas (Figura 7-37).

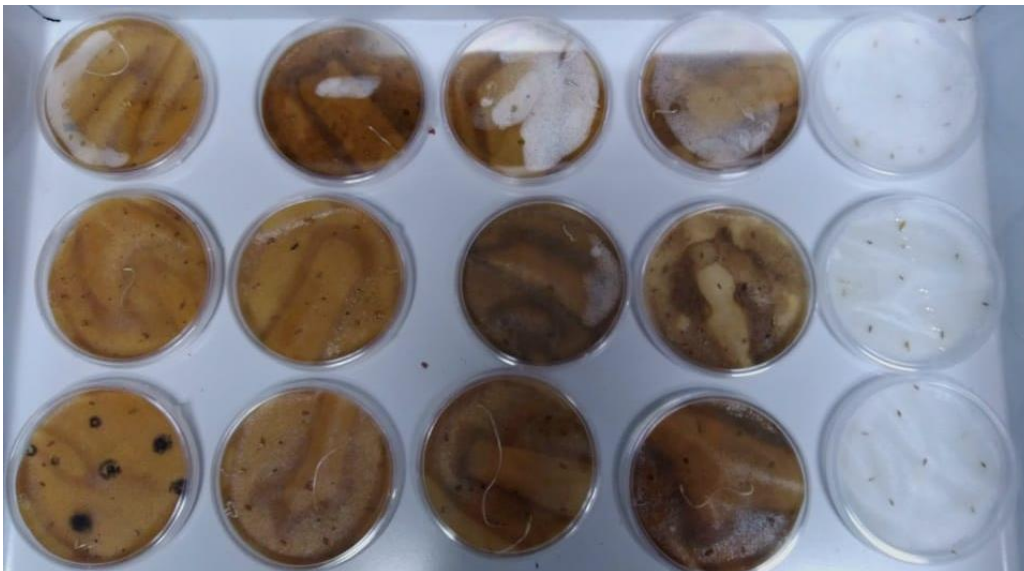


Figura 7-37. Pruebas de fitotoxicidad de semillas de lechuga

En la Tabla 7-8 se presenta la elongación de la retícula de las semillas de lechuga germinadas. Se observó mayor germinación en los tratamientos de residuos de café en comparación al tratamiento control. Esta deficiencia puede deberse a que las semillas de lechuga necesitan de más cuidados para su adecuado crecimiento.

Tabla 7-8. Datos obtenidos en la medición de retícula de las semillas de lechuga

Tratamiento		Elongación de retícula (cm)	
		Semilla 1	Semilla 2
Blanco	a	3.00	-
	b	3.50	1.70
	c	-	-
1	a	2.40	-
	b	3.40	0.80
	c	6.80	0.50
2	a	5.30	1.40
	b	1.20	-
	c	2.90	0.50
3	a	3.20	8.50
	b	1.10	-
	c	6.50	1.40
Control	a	6.70	-
	b	0.80	-
	c	1.30	1.20

Finalmente, en la Tabla 7-9, se muestran la cantidad de lombrices encontradas en cada tratamiento, tanto lombrices adultas como las crías. Además, también se muestran la cantidad de cocones contabilizados.

En la Tabla 7-10 se presenta la suma total de lombrices y cocones por tratamiento, se observa un aumento en la cantidad de lombrices conforme se redujo la proporción de residuos de café, lo que indica que prefieren un ambiente con menor cantidad de residuos de café, debido a que éstos tienen un pH ácido de 5.68. Las condiciones del tratamiento 3 fueron más efectivas para la reproducción y crecimiento de lombrices.

Tabla 7-9. Cantidad de lombrices y cocones hallados en los tratamientos

Tratamiento		Lombrices adultas	Crías de lombrices	Cocones
1	a	9	2	5
	b	3	84	15
	c	1	-	16
2	a	7	221	25
	b	7	91	5
	c	7	256	81
3	a	11	308	73
	b	9	363	53
	c	9	310	46
Control	a	14	97	193
	b	14	378	96
	c	14	374	98

De igual forma, en el tratamiento control se encontró una gran cantidad de lombrices y cocones, lo que sugiere ser un tratamiento favorable. En contraste, en el tratamiento 2 la eficiencia disminuyó significativamente, ya que se encontraron menos crías de lombriz y cocones, y la población de lombrices se redujo en un 50 % respecto las que se añadieron al inicio. Finalmente, el tratamiento 1 fue el menos efectivo para la supervivencia de las lombrices, debido a que se encontraron solo 4 lombrices adultas de las 14 añadidas, y la reproducción también se vio afectada.

Tabla 7-10. Cantidad en promedio de lombrices y cocones hallados en los tratamientos

Tratamiento	Lombrices adultas	Crías de lombriz	Cocones
1	4	43	12
2	7	189	37
3	10	327	57
Control	14	283	129

7.6 Recomendaciones

Algunas recomendaciones para mejorar la evaluación del tratamiento de los residuos de café en grano generados en la cafetería gourmet de la UAM-A mediante lombricomposteo son:

- Implementar un plan de separación para los residuos de café de grano en la cafetería gourmet, asegurando su separación de otros residuos tanto orgánicos como inorgánicos, ya que durante la recolección de los residuos se encontraron restos de taparrosas y envolturas de plástico.
- Promover el tratamiento de residuos de café de grano, mediante lombricomposteo a mayor escala, debido a los resultados obtenidos se considera que es viable obtener un humus de buena calidad para favorecer el crecimiento de plantas por su adecuado contenido de nutrientes y así aprovechar al máximo los residuos de café de grano.
- Mantener a las lombrices en un recipiente sellado adecuadamente para evitar que escapen durante el vaciado de sus estómagos, cuidando que la tapa tenga las perforaciones necesarias para garantizar una buena oxigenación.
- Se recomienda utilizar proporciones inferiores al 50 % de residuos de café mezclados con composta madura para lograr una mayor eficiencia, asegurando un balance adecuado de nutrientes. Otra opción viable, es manejar las mismas proporciones de residuos de café de grano mezclándolos con otros residuos orgánicos como las cascara de fruta que se generan en la cafetería gourmet.
- Realizar el monitoreo adecuado y constante (una vez por semana), que permita regular parámetros básicos como temperatura, pH, conductividad eléctrica y humedad, para asegurar las condiciones óptimas de degradación de los residuos de café de grano.
- Crear campañas de concientización sobre la gestión adecuada de los residuos de café de grano, con el fin de concientizar a la comunidad

universitaria sobre los beneficios de crear lombricomposta para la degradación de estos residuos.

8. Conclusiones

El presente proyecto de investigación sobre la evaluación de diferentes tratamientos de lombricomposteo para la degradación de residuos de café de grano generados en la cafetería gourmet de la UAM-A, mostró resultados que permiten desarrollar una gestión adecuada de los mismos. Se realizó una caracterización inicial de los sustratos, así como el monitoreo de los tratamientos y la caracterización final de los tratamientos, lo que permitió cumplir con los objetivos establecidos.

Los tratamientos de lombricomposteo demostraron ser efectivos en la descomposición de residuos de café, se obtuvieron porcentajes de materia orgánica, nitrógeno total y relación C/N dentro del intervalo óptimo. Esto favorece la actividad microbiana y el crecimiento de las lombrices. Sin embargo, el tratamiento control mostró una relación alta de C/N (16:1), indicando una descomposición más lenta debido al exceso de carbono en relación con el nitrógeno, lo que señala la eficiencia de los tratamientos con residuos de granos de café.

En términos de fitotoxicidad, los tratamientos que contienen residuos de café presentaron un mejor rendimiento en la germinación y crecimiento de semillas de rebano en comparación con el tratamiento control. Esto sugiere que los residuos de café aportan nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, mientras que los residuos de fruta pueden no ser tan eficientes para promover la germinación (con índice de germinación de 50.91 %).

Con base a los resultados obtenidos, se concluye que el lombricomposteo de residuos de café es efectivo en todos los tratamientos, siendo los tratamientos 2 y 3 los más favorables para la supervivencia de lombrices, ya que prefieren condiciones con menor contenido de residuos de café. Además, el tratamiento 2 es el que más promueve el crecimiento de plantas (semillas de rábano) con un índice de germinación del 83.87 %, lo que indica que no hay toxicidad y que presenta adecuada aportación de nutrientes como el nitrógeno, fósforo y potasio. En cuanto mayor eficiencia le siguen el tratamiento 3 y 1 con un índice de germinación de 63.87 y 58.68 %, respectivamente.

9. Referencias bibliográficas

- AlephUAM_A. (2018). *Boletín informativo de la UAM-A*.
<https://alephuamazcapotzalco.wordpress.com/2018/01/12/de-mil-474-kilos-de-basura-generados-a-diario-en-la-uam-a-solo-se-reciclan-68/>
- AlephUAM_A. (2020, October 2). *Creando un transporte para aplicaciones biomédicas*.
- Amalia, N., Safira, N., Citrasari, N., & Hariyanto, S. (2021). *El potencial de la tecnología de compostaje de residuos de café utilizando activadores microbianos para reducir los residuos sólidos en la industria del café*.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/802/1/012027>
- Angulo, L. (2009a). *Gestión integral de los residuos sólidos de la UAM-Azcapotzalco*. <https://www.jornada.com.mx/2009/06/01/eco-l.html>
- Angulo, L. (2009b). *La jornada ecológica*.
<https://www.jornada.com.mx/2009/06/01/eco-l.html>
- Armes, K. (2024). *¿Cuál es la diferencia entre compostaje y vermicompostaje?*
<https://www.gardentowerproject.com/blogs/soil-vermicomposting/what-is-the-difference-between-composting-and-vermicomposting>
- Asmak, A., Endar, H., Yoshiharu, M., Taizo, M., & Hiroyuki, H. (2021). *Estudios sobre el compostaje de posos de café gastados por Aspergillus sp y Aspergillus sp en control de temperatura aeróbico estático por lotes*.
<https://doi.org/10.4236/jacen.2021.101007>
- Bahena, L. (2023). *La industria del café en México espera crecer hasta un 5% en 2023*. <https://thefoodtech.com/industria-alimentaria-hoy/la-industria-del-cafe-en-mexico-espera-crecer-hasta-un-5-en-2023/#:~:text=El sector cafetero en el,a 311.000 toneladas en 2022.>
- BIOECO. (2021). *Cápsulas de café, ¿cuánto contaminan? ¿las hay ecológicas?*
<https://www.bioecoactual.com/2021/03/20/capsulas-cafe-contaminan-ecologicas/>
- Briceño, A., & Pérez, A. (2026). *Utilización del humus Lombriz Roja Californiana (EISENIA FOETIDA) como alternativa amigable al medio ambiente para el*

- cultivo del café*. <https://core.ac.uk/download/pdf/84460624.pdf>
- Bueno, P., Díaz, J., & Cabrera, F. (n.d.). *Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje*.
[https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores que afectan al proceso de compostaje.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf)
- Cámara de Diputados del H. Congreso. (2023). *Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos*.
- Carrillo, O. (2022). *Informe de Actividades de la Unidad Azcapotzalco 2022*.
<https://coplan.azc.uam.mx/webdocumentos/informes/Informe2022.pdf>
- Castellanos, P. D. (2020). *Estrategias y tendencias del aprovechamiento de la pulpa y mucilago del café en Colombia*.
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/38792/pdcastellanosr.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Castillo, X., García, C., & Eymar, E. (n.d.). *Determinación del flujo de liberación de CO₂ de materiales orgánicos compostados en relación al contenido de humedad*. [https://www.sech.info/ACTAS/Acta nº 59. X Jornadas del Grupo de Sustratos/Comunicaciones/Determinación del flujo de liberación de CO₂ de materiales orgánicos compostados en relación al contenido de humedad.pdf](https://www.sech.info/ACTAS/Acta%20n%C3%B9m%2059.%20X%20Jornadas%20del%20Grupo%20de%20Sustratos%20Comunicaciones%20Determinaci%C3%B3n%20del%20flujo%20de%20liberaci%C3%B3n%20de%20CO2%20de%20materiales%20org%C3%A1nicos%20compostados%20en%20relaci%C3%B3n%20al%20contenido%20de%20humedad.pdf)
- CEDICAFÉ. (2023). *Guía para la producción de lombricomposta*.
<https://www.anacafe.org/uploads/file/56fbddb9b6db40c182e9886b85f5583c/Guia-produccion-lombricompost.pdf>
- Chávez, J. (2023). *Una perspectiva para la reacción de licuefacción del grano de café gastado*.
[https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000837778/3/0837778.pdf#:~:text=cualquier tipo de café \[10%2C 12\]. El,trigonelina%2C ácidos carboxílicos y fenólicos%2C y compuestos](https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000837778/3/0837778.pdf#:~:text=cualquier%20tipo%20de%20café%20[10%2C%2012].%20El,trigonelina%2C%20ácidos%20carboxílicos%20y%20fenólicos%2C%20y%20compuestos)
- Claudia, G.-A., Luis Antonio, R.-R., Juan Fernando, G.-T., & Ana Angélica, F.-P. (n.d.). *Revalorización de residuos del cultivo de café: rumbo a una economía circular*.
- Consultores CGS. (2021). *Tipos de residuos*.
<https://www.facebook.com/photo.php?fbid=1330824903969788&id=84284215>

9434734&set=a.846195342432749

- Dadi, D., Daba, G., Bayene, A., P, L., & Van der Bruggen, B. (2019). *Compostaje y co-compostaje de cascarilla y pulpa de café con residuos sólidos municipales separados en origen: un gran avance en la valorización de los residuos de café*. 263–277. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40093-019-0256-8.pdf>
- Du, C., Abdullah, J. J., Greetham, D., Fu, D., Yu, M., Ren, L., Li, S., & Lu, D. (2018). Valorization of food waste into biofertiliser and its field application. *Journal of Cleaner Production*, 187, 273–284. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.211>
- Elizarrarás, L. (2024). *Comida a \$3 pesos en la UAM (\$0.18 USD)*. <https://www.youtube.com/watch?v=D1RmQLuvvMI&t=413s>
- Fertilizantes Orgánicos SAC. (2015). *Conductividad Eléctrica en las enmiendas orgánicas (compost): Importancia, efecto y recomendaciones*. <https://www.fosacperu.com/conductividad-electrica-en-las-enmiendas-organicas-compost-importancia-efecto-y-recomendaciones/>
- Fuentes, L. (n.d.). *La crianza de la lombriz roja*. 28. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1987_01.pdf
- Gallego, Y. (2022). *Compostaje y lombricultivo*. https://prometeo.matem.unam.mx/recursos/VariosNiveles/iCartesiLibri/recursos/Compostaje_y_lombricultivo/index.html?page=2
- Garcia, C., & Félix, J. (2014). *Manual para la producción de abonos orgánicos y biorracionales*. https://www.ciaorganico.net/documypublic/271_Manual_para_la_produccion_de_abonos_organicos_y_biorracionales.pdf
- Gipuzkoa. (n.d.). *Interpretación de los análisis de compost*. https://www.gipuzkoa.eus/documents/2227195/2229015/interpretacioncompost_v1.pdf/26b0b56f-ff7d-af7c-56c6-0faac739b012
- González, H., & Sadeghian, S. (n.d.). *Volatilización del nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café*. <https://biblioteca.cenicafe.org/jspui/bitstream/10778/518/1/arc063%281%2913>

2-143.pdf

Gracia, K., Bravo, C., & Merchán, J. (n.d.). *Anatomía y fisiología de la lombriz roja californiana*. <https://prezi.com/fzmaua9adfsk/anatomia-y-fisiologia-de-la-lombriz-roja-californiana/>

Grande, C. (2023). *Aportes en gestión y tratamiento de residuos de la UAM, proyecto exitoso 2023 del Conahcyt*.
<https://www.comunicacionsocial.uam.mx/boletinesuam/614-23.html>

Ground to Ground. (2024). *La magia del vermicompostaje: cómo aprovechar el poder de las lombrices para lograr un suelo saludable*.
<https://groundtoground.org/2024/02/18/the-magic-of-vermicomposting-harnessing-worm-power-for-healthy-soil/>

Gutiérrez, C., Rodríguez, L. A., García, J. F., & Feregrino, A. A. (2020). *Revalorización de residuos del cultivo de café: rumbo a una economía circular*. 71–79. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/107/103>

Hanna Instruments. (n.d.). *Manual para test de suelos*.
https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/support/manual/2018/10/Manual_3896BP.pdf

Hanna Instruments. (2024). *Kit Químico de pruebas de suelo para NPK*.

Herrera, J., Rojas, J., & Anchía, D. (n.d.). *Tasas de generación y caracterización de residuos sólidos ordinarios en cuatro municipios del área metropolitana costa rica*. <https://www.redalyc.org/journal/4517/451748499010/html/>

Khan academy. (n.d.). *El ciclo del fósforo*.
<https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/the-phosphorous-cycle>

Laboratorios A-L de México S.A. de C.V. (n.d.). *Compostas. Evaluación de la calidad del producto*. <https://www.laboratoriosaldemexico.com.mx/wp-content/uploads/2023/11/Compostas.-Evaluaciones-de-la-Calidad-del-Producto.pdf>

LCDRI. (n.d.). *Propiedades físicas de los residuos sólidos urbanos*.
<https://www.lcdri.com/news/physical-properties-of-municipal-solid-waste/>

Lombritec. (n.d.). *Infografías de lombriz roja californiana (Eisenia Foetida)*.

- <https://lombritec.com/infografias/>
- Low Technology Institute. (2018). *Vermicompost 101 — Worm Anatomy*.
<https://lowtechinstitute.org/2018/08/14/vermicompost-101-worm-anatomy/>
- Manchay, L., & Meza, H. (2023). *Aprovechamiento de los residuos de café mediante lombricompost y bocashi para incrementar el rendimiento del rabanito (Raphanus sativus)* [Universidad César Vallejo].
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/124256/Manchay_CLY-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=El%20aprovechamiento%20de%20los%20residuos,medio%20ambiente%20suelo%20y%20agua
- Marín, C., & Puerta, G. (2008). *Contenido de ácidos clorogénicos en granos de café*. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc059%2801%29007-028.pdf>
- Maslin, M., & Nab, C. (2021). *Análisis: este es el costo de carbono de tu café diario y cómo hacerlo amigable con el clima*.
[https://www.ucl.ac.uk/news/2021/jan/analysis-heres-carbon-cost-your-daily-coffee-and-how-make-it-climate-friendly#:~:text=Decarbonising a cup of coffee&text=The average cup of coffee,0.06 kg if grown sustainably](https://www.ucl.ac.uk/news/2021/jan/analysis-heres-carbon-cost-your-daily-coffee-and-how-make-it-climate-friendly#:~:text=Decarbonising%20a%20cup%20of%20coffee&text=The%20average%20cup%20of%20coffee,0.06%20kg%20if%20grown%20sustainably)
- Mcmillan, C. (2023). *Explorando los impactos ambientales de la producción de café - Cafeteros*. <https://happycoffeemaker.com/exploring-the-environmental-impacts-of-coffee-production/>
- Melo, C. (2023a). *El empaque del café y sus implicaciones ambientales*.
<https://www.eraofwe.com/coffee-lab/es/articles/el-empaque-del-café-y-sus-implicaciones-ambientales>
- Melo, C. (2023b). *El impacto histórico del café en los bosques*.
<https://www.eraofwe.com/coffee-lab/es/articles/el-impacto-histórico-del-café-en-los-bosques>
- Melo, C. (2023c). *La compleja relación entre el café y la salud del suelo*.
<https://www.eraofwe.com/coffee-lab/es/articles/la-compleja-relación-entre-el-café-y-la-salud-del-suelo>

- Moviento de Jóvenes por el Agua, A. C. (2020). *Lombricomposta*.
<https://www.moja.org/2020/06/13/lombricomposta/>
- Navarrete, J. (2024). *Análisis de la composición y eficiencia de la separación de los residuos sólidos urbanos de la UAM-A*.
- Pedrotti, V. (2018). *Transformación biológica de la pulpa de café por medio del lombricultivo*. <https://dailycoffeenews.com/2018/09/10/transformacion-biologica-de-la-pulpa-de-cafe-por-medio-del-lombricultivo/>
- Portte Café. (n.d.). *Composición de los subproductos del café*.
<https://porttecafe.com/blog/composicion-de-los-subproductos-del-cafe/>
- Prado, J. (2013). *Manual de lombricompostaje de pulpa del café para los caficultores de la región Otomí*.
http://www.earthgonomic.org/biblioteca/Taller_Lombricomposta/Manual_de_lombricompostaje.pdf
- Pur Plant. (n.d.). *Todo sobre la lombriz roja californiana*.
<https://www.purplant.es/blog/todo-sobre-lombriz-roja-californiana/?srsltid=AfmBOoqvqBxKJxkxk8Px5RT4VNutCSHM7yWHI5YmukBtJ0mQuxlRmpXC>
- Rodríguez, N., & Zambrano, D. (2010). *Los subproductos del café: fuente de energía renovable*. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0393.pdf>
- Rodríguez, R., Guyot, S., Gutierrez, G., & Jorge, W.-P. (2013). *Alternativas actuales para el manejo sustentable de los residuos de la industria del café en México*.
https://www.researchgate.net/publication/260714119_Alternativas_Actuales_para_el_Manejo_Sustentable_de_los_Residuos_de_la_Industria_del_Cafe_en_Mexico/link/0a85e5320e3340cc93000000/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uliwicGFnZSI6I
- Salazar, M. (2008). *Diagnóstico de la sostenibilidad ambiental de la producción de café en Colombia*.
https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/1084/Salazar_Echeverry_Hugo_Mauricio_2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- SE. (2018). *Norma mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018. Que establece los*

métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales.

SECOFI. (1984a). *NMX-AA-016-1984. Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-determinación de humedad.*

SECOFI. (1984b). *NMX-AA-025-1984 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos - Determinación del PH - Método potenciométrico.*

SECOFI. (1984c). *NMX-AA-24-1984. Protección al ambiente - contaminación del suelo -residuos sólidos municipales - determinación de nitrógeno total.*

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-024-1984.pdf>

SECOFI. (1985a). *NMX-AA-015-1985. Protección al ambiente contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-muestreo método de cuarteo.*

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-015-1985.pdf>

SECOFI. (1985b). *NMX-AA-021-1985. Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-determinación de materia orgánica.*

SECOFI. (1985c). *NMX-AA-067-1985. Protección al ambiente - contaminación del suelo -Residuos sólidos municipales - Determinación de la relación carbono / nitrógeno.*

Secretaría de Economía. (2008). *NMX-FF-109-SCFI-2007. Humus de lombriz (lombricomposta) - especificaciones y métodos de prueba.* <http://economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2007/nmx-ff-109-scfi-2008.pdf>

SEDEMA. (2022). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de Mexico 2021* (p. 365).

<https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/residuos/InventariodeResiduosSolidos2021.pdf>

Separación UAM Azcapotzalco. (2022). *SeparAcción.*

<https://www.facebook.com/photo/?fbid=585928016657894&set=pb.100057221028523.-2207520000>

Sistemas integrados de gestión. (n.d.). *Cuantificación volumétrica de basura.*

- Tortosa, G. (2013). *Un nuevo método para conservar el nitrógeno durante el compostaje*. <https://www.compostandociencia.com/2013/03/perdidas-nitrogeno-html/>
- Uncle Jim's Worm Farm. (2017). *The Anatomy of a Red Wiggler Composting Worm – Eisenia fetida*. <https://unclejimswormfarm.com/anatomy-red-wiggler-composting-worm/>
- VermiHumus. (n.d.). *¿Cómo afecta la temperatura a las lombrices?* <https://www.vermihumus.es/como-afecta-la-temperatura-a-las-lombrices/#:~:text=La temperatura influye en la actividad metabólica de,reduce%2C lo que afecta su crecimiento y reproducción.>

10. Anexos

A continuación, se muestra el cuestionario realizado durante la primera semana del trimestre 24-P (Anexo 10-1).

10.1 Encuesta sobre el manejo de residuos sólidos en la cafetería de Barra Fría UAM-A

Información general de la persona encuestadora

Alumna: Alexandra Torres Cerón

Matrícula: 2193003193

Carrera: Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Trimestre: 24-P

Fecha: 15 de julio de 2024

Preguntas

- 1. ¿Cuál es su nombre y qué cargo ocupa dentro de la cafetería de barra fría de la UAM-A?** Silvia Lemus, soy supervisora de barra fría.
- 2. ¿Cuáles son los horarios en los que se brinda el servicio de cafetería de barra fría?** El turno matutino es de 8:00 am a 13:00 pm, y el turno vespertino de 14:00 pm a 18:00 pm.
- 3. ¿Qué tipos de alimentos y bebidas se venden en barra fría de la cafetería?** Chapatas, cocteles de fruta, hot dogs, hamburguesas, yogurt y chocolate caliente y café.
- 4. En cuanto al café, ¿qué tipo de café se vende?** Capuchino, americano, café con leche, café expreso y saborizado.

5. **¿Cuántas personas, por turno, se encargan de ofrecer los servicios de cafetería?** En cada turno, hay cuatro personas que se encargan de preparar los alimentos y otras dos se destinan a la limpieza de cafetería.
6. **¿Cuántas personas, por turno, se encargan de ofrecer los servicios de cafetería?** En cada turno, hay cuatro personas que se encargan de preparar los alimentos y otras dos se destinan a la limpieza de cafetería.
7. **¿Cuántos trabajadores se destinan a cada actividad en la cafetería?** Una persona se designa como cajero. Para la preparación de alimentos hay un cocinero, un ayudante y 2 auxiliares. **¿Cada trabajador tiene siempre el mismo cargo o se turnan las actividades?** Todos tienen un cargo asignado.
8. **¿Cuántas personas se encargan de preparar el café?** Una sola persona por turno.
9. **¿Cuál es la marca del café que se utiliza en la cafetería?** Es café tostado de grano, y se desconoce la marca.
10. **¿Con que frecuencia se suministra el café?** Una vez al mes.
11. **¿Cuántas vasos de café se preparan en promedio por día?** Se desconoce.
12. **¿Qué tipo de residuos de café se generan en la cafetería de barra fría en la UAM-A?** Únicamente se generan residuos de granos de café molido.
13. **Normalmente, ¿en qué contenedor se depositan los residuos de café? ¿se separan del resto de los residuos o se mezclan?** Los residuos se depositan en bolsas de plástico, y una parte se separan del resto de los

residuos, porque hay personas que nos solicitan el café para depositarlo en sus plantas.

14. ¿En qué temporada del trimestre y del año se genera una mayor cantidad de residuos de café? Al inicio de trimestre, y en temporada de frío.

15. ¿Qué cantidad aproximada de residuos de granos de café se generan diariamente en la cafetería de barra fría de la Universidad? 2 kg por turno, aproximadamente.

16. ¿Cuál es el procedimiento habitual de la recolección de los residuos de café? Se depositan donde van los residuos de fruto, en contenedores de plástico.

17. ¿Con que fines se realiza ese procedimiento de recolección de los residuos? Cuando se separan de los demás residuos, es porque hay personas que nos solicitan cierta cantidad de ellos, y lo utilizan como abono para sus plantas.

18. ¿A quién o a qué institución/empresa se le entregan los residuos de café? A los profesores que nos solicitan los residuos de café.

19. ¿Por qué se les entrega estos residuos a las personas que lo solicitan? Porque hay personas que consideran que los residuos de café pueden ser útiles como abono o para el cuidado de sus plantas. Por esa razón, preferimos entregárselos a quienes los solicitan en lugar de desecharlo.

20. Actualmente, ¿se les da un tratamiento a los residuos de café? No, no le damos ningún tratamiento a los residuos, solo los desechamos a la basura.

21. Si no se les da un tratamiento, ¿cuál es su disposición final? Se depositan en los residuos de fruta.