



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM
FACULTAD CIENCIAS DE LA VIDA
INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

***ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS POR MEDIO DE
DIGESTIÓN ANAEROBIA Y COMPOSTAJE. CASO DE
ESTUDIO IKIAM.***

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

AUTOR: RUTH ALEXANDRA GUEVARA ZAMBRANO

TUTOR: Mgs. RODRIGO EDUARDO ESPINOSA BARRERA

CO-TUTOR: Mgs. CRISTHIAN DAVID CHICAIZA ORTIZ

Napo - Ecuador

2024

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Ruth Alexandra Guevara Zambrano, con documento de identidad N° 1850690171, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de Ingeniería en Biotecnología, son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Tena, 07 de marzo de 2024



Ruth Alexandra Guevara Zambrano

CI: 1850690171

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Ruth Alexandra Guevara Zambrano, con documento de identidad N° 1850690171, en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS POR MEDIO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA Y COMPOSTAJE. CASO DE ESTUDIO IKIAM”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Tena, 07 de marzo de 2024



Ruth Alexandra Guevara Zambrano

CI: 1850690171

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico que el Trabajo de Integración Curricular Titulado: “ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS POR MEDIO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA Y COMPOSTAJE. CASO DE ESTUDIO IKIAM” en la modalidad de: tesis, fue realizado por: Ruth Alexandra Guevara Zambrano, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 07 de marzo de 2024



Firmado electrónicamente por:
**RODRIGO EDUARDO
ESPINOSA BARRERA**

Tutor: MSc. Rodrigo Eduardo Espinosa Barrera

C.I: 1707458079



Firmado electrónicamente por:
**CRISTHIAN DAVID
CHICAIZA ORTIZ**

Co-tutor: MSc. Cristhian David Chicaiza Ortiz

C.I: 1500637887

DEDICATORIA

A Dios, quien supo guiarme, darme las fuerzas para seguir adelante, encarar las adversidades y no desfallecer ante los desafíos, por permitirme llegar hasta este punto y haberme dado la salud para lograrlo.

A mis padres, María Zambrano y Rodrigo Guevara, quienes son los cimientos de mi existencia. Estoy eternamente agradecida por su amor incondicional, dedicación incansable, sacrificios y apoyo constante han sido mi mayor inspiración, muchos de mis logros se los debo a ustedes ¡gracias! por permitirme trazar mi propio camino y destino. A mis hermanos, Sandra y Rodrigo, mi profundo agradecimiento por sus enseñanzas, sus palabras de aliento y por estar siempre presentes cuidándome. De una forma u otra, han sido mis compañeros fieles en cada sueño y meta que he perseguido. Los amo con todo mi ser.

A María Albán y Eduardo Barrionuevo, a quienes quiero como mis segundos padres. Les agradezco por creer en mí y por permitirme ser parte de su hogar. Su generosidad y afecto han tejido un tapiz de amor que ha enriquecido mi vida de maneras invaluable. A sus hijas Gabriela y Daniela, por compartir conmigo momentos significativos y brindarme una amistad, llena de confianza y apoyo mutuo. Sus sonrisas y ocurrencias logran contagiarme de alegría. Cada gesto de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi corazón. Gracias por ser la familia que la vida me regaló.

A Andrés Rueda, por ser una parte esencial de mi vida, quien con su amor, paciencia, confianza y palabras de aliento me ha dado la fortaleza para continuar firme en cada decisión y paso dado. Le agradezco por compartir este viaje a mi lado y por enseñarme el significado del amor y respeto.

En memoria de mi querida amiga, Alisson Paredes, cuya partida dejó un vacío profundo en mi corazón. Rindo homenaje a su espíritu amable y afectuoso; recordarla con amor y cariño me inspira a seguir adelante. Su memoria será un faro de amor y compasión que ilumine mi camino, trascendiendo incluso la tristeza más profunda.

A Lenin Vásquez, por ser un gran amigo, por su cariño, por su capacidad de ver las cosas de manera positiva y por su perseverancia. Le agradezco por no dudar de mis capacidades y por estar en los momentos que he necesitado orientación y consejos.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Regional Amazónica Ikiam, a su personal y docentes, por haberme guiado y apoyado en todo el transcurso de mi carrera.

A mi tutor, Rodrigo Espinosa, quiero agradecerle por su paciencia infinita y su apoyo incondicional a lo largo de este viaje académico. A mi cotutor, Cristhian Chicaiza, le agradezco sinceramente por su confianza en mi trabajo, su apoyo constante y las valiosas enseñanzas que compartió conmigo, su orientación y sabiduría fueron fundamentales para superar los desafíos que surgieron durante la investigación.

Al Laboratorio de Química de Enseñanzas y al Laboratorio de Investigación de Biomasa por su colaboración al proporcionarme reactivos y materiales. Su disposición para ayudar fue un componente clave en la realización de este estudio. También, agradezco a los técnicos de laboratorio Carolina Ñacato y Marcos Hidalgo, cuyo apoyo y consejos fueron de gran ayuda durante la realización de esta investigación.

A mis amigos, Saraí Gaibor y Mathew Gaibor les agradezco por su constante apoyo emocional y por ser fuentes de inspiración. Su amistad ha sido un pilar fundamental durante este proceso académico.

Finalmente, quiero agradecer a la vida misma por cada desafío y oportunidad que me ha brindado. Cada obstáculo superado y cada logro alcanzado me ha enseñado que la verdadera esencia del éxito radica en el esfuerzo y la pasión que ponemos en aquello que amamos.

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR.....	ii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. <i>Compostaje</i>	2
1.1.2. Digestión Anaerobia (DA)	3
1.1.2.1 <i>Ensayo de Potencial Bioquímico de Metano</i>	4
1.1.3. Análisis del ciclo de vida.....	5
1.1.3.1 <i>SimaPro, método ReCiPe y base de datos para el ACV</i>	7
1.1.3.2 <i>Estudios Previos utilizando el enfoque de ACV</i>	7
1.2. Planteamiento del problema	8
1.3. Justificación de la investigación	9
1.4. Objetivos de la investigación	10
1.4.1. Objetivo General	10
1.4.2. Objetivos Específicos	10
CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO	11
2.1 Sitio de muestreo.....	11
2.2 Fase experimental	12
2.2.1 Delimitación del expendio de RA.....	12
2.2.2 Encuestas generación de RA	12
2.2.3 Recolección, cuantificación y clasificación de los RA.....	12
2.2.4 Acondicionamiento de muestras	13
2.2.5 Análisis de sólidos totales de inóculo y sustrato	13
2.2.6 Análisis de sólidos volátiles de inóculo y sustrato	14
2.2.7 Determinación porcentaje de cenizas en inóculo y sustrato	14

2.2.8	Medición de pH y conductividad.....	15
2.2.9	Potencial Bioquímico de Metano (PBM).....	15
2.2.10	Medición de metano	16
2.2.11	Análisis de ácidos grasos volátiles por titulación.....	18
2.3.	Fase de análisis de ciclo de vida ACV	19
2.3.1	<i>Objetivo, alcance y límite del estudio</i>	20
2.3.2	<i>Generación de inventario</i>	20
2.3.3	<i>Evaluación del impacto ambiental</i>	22
2.3.4	<i>Interpretación de Resultados</i>	23
CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS		24
3.1	Resultados de la encuesta inicial.....	24
3.1.1	Preguntas relevantes	24
3.2	Clasificación y cuantificación de los pesos generados de RA.....	25
3.3	Caracterización de sustratos	29
3.4	Producción de metano en PBM	29
3.5	Ácidos grasos totales.....	30
3.6	Resultados del SimaPro	31
CAPÍTULO IV: INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN		34
4.1	<i>Fase experimental y recolección de datos.</i>	34
4.2	<i>Fase de análisis de ciclo de vida</i>	34
4.2.1	<i>Calentamiento global</i>	35
4.2.2	<i>Agotamiento del ozono estratosférico</i>	35
4.2.3	<i>Formación de partículas finas</i>	36
4.2.4	<i>Acidificación terrestre</i>	37
4.2.5	<i>Escasez de recursos fósiles</i>	37
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		38
REFERENCIAS		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ensayos PBM de restos alimenticios.....	16
Tabla 2.	Compost generado a partir de la masa total de RA-URAI y masa de la unidad funcional para el ACV	21
Tabla 3.	Volumen de CH ₄ y CO ₂ extrapolados a 1 tonelada como unidad funcional para el ACV	21
Tabla 4.	Inventario de entradas y salidas del escenario compostaje S1 basadas en 1 tonelada.....	21
Tabla 5.	Inventario de entradas y salidas del escenario S2, basadas en una unidad funcional de 1 tonelada.....	22
Tabla 6.	Clasificación de los RA en según su peso y su característica lignocelulósica.....	26
Tabla 7.	Características fisicoquímicas de EV y RA.....	29
Tabla 8.	Resultados PBM experimentales.....	29
Tabla 9.	Volumen de CH ₄ , CO ₂ y biogás generado a partir del total de RA-URAI ...	30
Tabla 10.	Concentración de ácidos grasos volátiles, acidez volátil y la acidez total, al inicio de la investigación.	31
Tabla 11.	Concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV), acidez volátil y la acidez total, al inicio de la investigación	31
Tabla 12.	Resultados numéricos de impacto ambiental evaluados por el método ReCiPe Mindpoint	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de metodología de ACV	7
Figura 2.	Esquema del sitio de estudio	11
Figura 3.	Sistema de medición por desplazamiento volumétrico.....	17
Figura 4.	Ajuste de pH con HCl 0.1 M y NaOH 0.1 M.	19
Figura 5.	Límite del sistema para escenarios compostaje y digestión anaerobia ...	20
Figura 6.	Tipo de residuo que generan los PDC en la URAI.	24
Figura 7.	Restos alimenticios acumulados en los PDC durante 29 semanas de evaluación.	27
Figura 8.	Pesos acumulados de RA por semana - periodo académico (marzo - agosto 2023).....	28
Figura 9.	Pesos acumulados de RA por semana -periodo (octubre - diciembre 2023)	28
Figura 10.	Producción de metano en los ensayos de PBM	30
Figura 11.	Impacto ambiental de los escenarios S1 y S2 de la gestión de RA a través de ReCiPe MindPoint.	32
Figura 12.	Impacto ambiental de los escenarios S1 y S2 de la gestión de RA a través de ReCiPe EndPoint.	33

RESUMEN

En el contexto de la gestión ambiental adecuada de la Amazonía, se considera fundamental la implementación del manejo sostenible de los residuos sólidos orgánicos (RSO). Este estudio tuvo como objetivo realizar una evaluación ambiental de la gestión de residuos alimenticios (RA) generados en la Universidad Regional Amazónica Ikiam (URAI) durante el 2023. La metodología consistió en la comparación del tratamiento actual (S1), por compostaje y una alternativa (S2) por medio de digestión anaeróbica (DA) llevada a cabo en dos fases: experimental y análisis de ciclo de vida (ACV). Durante la fase experimental, se realizó un levantamiento de la línea base mediante encuestas a los propietarios de los puestos de comida (PDC) dentro del campus; se cuantificó los RA generados durante 134 días, y se implementó un análisis del potencial bioquímico de metano (PBM). Durante la segunda fase, los resultados se extrapolaron a una tonelada de RA, que fue la unidad funcional del ACV, siguiendo la normativa ISO 14040-14044:2006; se usó SimaPro 9.4.0, el método ReCiPe MindPoint y EndPoint, y la base de datos Ecoinvent 3, para evaluar los impactos ambientales. Con el método MindPoint, se reportaron mayores impactos ambientales para el escenario S1 en acidificación con 2,1495 kg SO₂ eq, seguido de formación de partículas finas con 0,421 kg PM_{2,5} eq y para calentamiento global 0,106 kg CO₂ eq. Mientras que, para el S2 en la mayoría de categorías proporciona mayores beneficios en términos de desempeño ambiental. Por otro lado, con el método EndPoint, se observó que el escenario S1 tiene un mayor impacto en la salud humana, y recursos. Se concluye que la digestión anaerobia puede ser una alternativa que presenta mayores beneficios ambientales respecto al compostaje de RA dentro del campus universitario.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida; impacto ambiental; residuos alimenticios; digestión anaerobia; compostaje.

ABSTRACT

In the context of the adequate environmental management of Amazon, the implementation of the sustainable management of organic solid waste (OSR) is considered fundamental. This study aimed to carry out an environmental assessment of the management of food waste (RA) generated at the Ikiam Amazon Regional University (URAI) during 2023. The methodology consisted in the comparison of the current treatment (S1), by composting and an alternative (S2) by means of anaerobic digestion (AD) carried out in two phases: experimental and life cycle analysis (ACV). During the experimental phase, a baseline rose was carried out using surveys to the owners of the food stalls (PDC) within the campus; the RA generated was quantified for 134 days, and an analysis of the biochemical methane potential (PBM) was implemented. During the second phase, the results were extrapolated to one ton of RA, which was the functional unit of the ACV, following the ISO 14040-14044:2006 standard; SimaPro 9.4.0, the ReCiPe MindPoint and EndPoint method, and the Ecoinvent 3 database were used to evaluate environmental impacts. With the MindPoint method, they reported higher environmental impacts for the S1 scenario in acidification with 2.1495 kg SO₂eq, followed by fine particle formation with 0.421 kg PM_{2.5}eq, and for global warming 0.106 kg CO₂eq. While, for the S2 in most categories it provides greater benefits in terms of environmental performance. On the other hand, with the EndPoint method, it was observed that the S1 scenario has a greater impact on human health and resources. It is concluded that anaerobic digestion presents greater environmental benefits concerning RA composting within the university campus.

Keywords: Life cycle analysis; environmental impact; food waste; anaerobic digestion; composting.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) se estima que se generan aproximadamente de 1,7 a 1,9 mil millones de toneladas métricas al año de Residuos Alimenticios (RA) a nivel mundial. Además, para el año 2025, la producción anual de RA aumentará a 2 500 millones de toneladas [1,2]. Estos residuos no solo representan una significativa huella de carbono, liberando alrededor de 3 300 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) anualmente, sino que también contribuyen entre el 8% y el 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) [3,4].

La FAO y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) han desarrollado índices específicos para abordar la "pérdida" y el "desperdicio" de alimentos [4]. El índice de pérdida de alimentos examina las pérdidas que ocurren durante la fabricación o a lo largo de la cadena de suministro antes de llegar a los puntos de venta minoristas; estos también se consideran residuos evitables. Por otro lado, el índice de desperdicio se enfoca en los productos alimenticios que son descartados al llegar al final de la cadena de suministro, ya sea por parte de los minoristas o los consumidores. Estos últimos son considerados como residuos inevitables [5].

Con base en el índice de desperdicio de alimentos, se estima que aproximadamente el 17% de los alimentos son desperdiciados [6]. Esta preocupante realidad ha llevado a las Naciones Unidas a incluir la meta 12.3 dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El propósito fundamental de esta meta es reducir a la mitad, para el año 2030 el desperdicio per cápita de alimentos a nivel mundial, tanto en el ámbito minorista como en el de los consumidores [3,5]. En cuanto a las posibles causas del desperdicio de alimentos por parte de los consumidores, se destaca la falta de prácticas de consumo responsable, comportamientos alimenticios inapropiados y una baja valoración de los alimentos basada en su estética, especialmente en el caso de las verduras y frutas. Además, se añade el desperdicio originado por preparaciones en exceso [5,7].

En Ecuador, se generan diariamente alrededor de 14 000 toneladas de desechos, superando los 5 millones de toneladas anuales, siendo el 56,2% de estos residuos sólidos orgánicos (RSO). La falta de una disposición adecuada de estos desechos orgánicos contribuye a problemas ambientales significativos [8,9]. A nivel nacional, 90 de los 221 Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM), están parcialmente comprometidos en aprovechar los RSO que gestionan. En particular la región Sierra lidera con 50 GADM, seguida por la región Amazónica con 24 GADM [10].

Vargas en 2017, propuso un plan integral de gestión para los residuos sólidos de la ciudad de Tena, resaltando que la producción de residuos está intrínsecamente vinculada a los hábitos y comportamientos de la ciudadanía. Además, destaca la importancia de comprender las características, cantidad y composición de estos residuos como elementos clave para prever y estructurar sistemas de gestión efectivos [11]. La posibilidad de recuperar recursos mediante prácticas como el compostaje y la digestión anaerobia (DA), se presenta como una solución eficiente para gestionar los RSO. Ambas cumplen con los principios biológicos de la economía circular mediante la producción de compost y digestato, respectivamente, generando beneficios ambientales netos [12].

1.1.1. *Compostaje*

El compostaje es un proceso aerobio de transformación biológica diseñado para descomponer la fracción orgánica presente en los RSO, buscando alcanzar estabilidad, madurez y sanitización. La utilización de RA en este proceso contribuye en gran medida a la minimización del volumen de RSO, aliviando la carga en vertederos y municipios, mejora el valor de los nutrientes, la estructura, retención de agua y trabajabilidad del suelo; protege contra parásitos y enfermedades de las plantas; disminuye el uso de fertilizantes artificiales; aumenta los rendimientos agrícolas; tiene una consideración ambiental; los costos operativos son bajos y prescinde de mano de obra altamente calificada [13,14].

El proceso de compostaje se divide en dos etapas claves: la primera, conocida como descomposición, implica la acción de microorganismos aerobios mesofílicos. Estos organismos descomponen compuestos de rápida degradación, como almidón, proteínas, azúcares y aminoácidos, en especies inorgánicas y orgánicas más simples [15]. Durante esta fase, se observa un aumento en la actividad biológica, caracterizada

por el consumo de O_2 , la emisión CO_2 y la generación de energía liberada en forma de calor [16,17]. Esta intensa actividad biológica persiste hasta que los niveles de nutrientes y materia orgánica fácilmente degradable disminuyen, marcando el final de la primera etapa. A partir de este punto, se inicia la segunda etapa, caracterizada por una actividad biológica menos intensa y una transformación progresiva de los residuos hacia un estado más estable y maduro el cual puede durar entre 2 a 6 meses [8,18]. Durante este proceso se generan emisiones a la atmósfera como: metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y CO_2 . Además, se producen gases que emiten malos olores tales como: amoníaco (NH_3), ácido sulfhídrico (H_2S), entre otros [15].

1.1.2. Digestión Anaerobia (DA)

La DA, destaca por emplear digestores como una tecnología eficaz para el tratamiento y aprovechamiento de los subproductos generados de los RA [8]. Este proceso biológico implica la descomposición y estabilización de la materia orgánica por microorganismos en ausencia de oxígeno [19]. Durante este proceso, se genera biogás, compuesto en su mayoría por aproximadamente 60% de CH_4 , que puede ser aprovechado como una fuente de energía renovable [20,21]. El porcentaje restante de biogás es principalmente CO_2 y trazas de otros gases como: hidrógeno molecular (H_2), nitrógeno molecular (N_2), NH_3 y vapor de agua [22].

Por otro lado, también se genera digestato, considerado como un efluente que contiene nutrientes esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y otros, lo que lo convierte en una opción potencial como biofertilizante en la agricultura [19]. El digestato es conocido por su capacidad de optimizar la productividad de los cultivos y reducir los GEI [23]. Además, el uso de digestato como nutriente eficiente puede reducir la dependencia de los fertilizantes químicos y mejorar la calidad del suelo [24].

La falta de estabilidad en los sistemas de monodigestión del proceso de DA, puede provocar una inestabilidad y, eventualmente un colapso en el sistema. Este problema se origina por un desequilibrio en los nutrientes y características fisicoquímicas del sustrato utilizado [25]. La co-digestión anaerobia (Co-DA), es un método que implica el tratamiento simultáneo de dos o más residuos orgánicos con el objetivo aprovechar la complementariedad en su composición. La combinación de residuos genera procesos más estables, mejora la producción de biogás y la disponibilidad de nutrientes [26].

El proceso de DA ocurre en cuatro etapas secuenciales de degradación de la materia orgánica, las cuales son: 1) hidrolisis: en esta etapa las macromoléculas orgánicas (proteínas, carbohidratos y lípidos), se descomponen en moléculas más simples (aminoácidos, monosacáridos y ácidos grasos de cadena larga), este proceso se lleva a cabo por enzimas extracelulares facultativas producidas por bacterias fermentativas; 2) acidogénesis: resulta en la formación de compuestos solubles más simples, metabolizados por bacterias acidogénicas que generan, principalmente, ácidos grasos volátiles, alcoholes, H_2 , CO_2 y otros productos intermedios; 3) acetogénesis: los ácidos grasos son posteriormente convertidos en acetato, H_2 y CO_2 , mediante bacterias acetogénicas; 4) metanogénesis: se transforman los productos de la fermentación en CH_4 y CO_2 por acción de bacterias metanogénicas [19]. Cada etapa experimenta velocidades de reacción distintas según la composición del sustrato, y el desarrollo estable del proceso global depende de un equilibrio que prevenga la acumulación de compuestos intermedios inhibidores y ácidos grasos volátiles (AGV), lo cual podría ocasionar una disminución del pH [27].

El proceso de DA se clasifica según el rango de temperatura en el que opera, dividiéndose en tres categorías principales: psicrófilo ($T < 25^\circ C$), mesófilo (T entre 25 y $45^\circ C$) y termófilo ($T > 45^\circ C$) [28]. Cada categoría exhibe características específicas que influyen en la actividad y eficiencia del proceso, destacándose el intervalo de 35 a $37^\circ C$ como el más propicio [29]. La cinética de la digestión anaeróbica sugiere que, en un rango biológicamente viable, a medida que la temperatura aumenta, también lo hace la tasa de degradación [30].

Los beneficios derivados de la DA son notables, destacándose la considerable reducción de olores desagradables, la mineralización de RA, la generación de energía renovable al aprovechar el gas resultante como fuente energética en lugar de depender de recursos fósiles. Además, la reducción de GEI se logra al minimizar las emisiones no reguladas de CH_4 , un gas cuyo potencial de efecto invernadero es aproximadamente 20 veces mayor que el CO_2 [27,31].

1.1.2.1 Ensayo de Potencial Bioquímico de Metano

El potencial bioquímico de metano (PBM) cuantifica experimentalmente la cantidad máxima de CH_4 generada a partir de la biodegradabilidad de un sustrato. Estos ensayos se llevan a cabo en reactores batch con el objetivo de determinar la selección de

sustratos e inóculos prometedores, así como prever el comportamiento de digestores a escala real [32]. La duración del ensayo de PBM depende de la biodegradabilidad del sustrato y, por lo tanto, no es posible establecer un periodo fijo; no obstante, se informa que aproximadamente en el lapso de 30 a 60 días se puede obtener una producción teórica de CH₄ de hasta el 90% [33].

Previo al ensayo PBM, es necesario tomar en cuenta la composición elemental y características fisicoquímicas del sustrato, ya que estos factores ejercen influencia en el metabolismo de los microorganismos y, por ende, afectan la cantidad de CH₄ generado [34]. Según Raposo et al. en 2011, es esencial realizar una caracterización previa del sustrato, para comprender y mitigar posibles fenómenos de inhibición. Además, es recomendable para los RA un tamaño de partícula menor o igual a 1cm [35],

En relación con la cantidad de sustrato a añadir, la estimación se basa en las recomendaciones para la concentración de inóculo y la relación sustrato/inóculo (S/I), expresada generalmente en términos de los SV ($gSV_{\text{sustrato}}/gSV_{\text{inóculo}}$) [36]. En la DA, es importante tanto la calidad como la cantidad de inóculo disponible, siendo recomendable emplear un inóculo activo para reducir el tiempo necesario y estabilizar los sustratos [35]. Aunque la aclimatación no es un proceso obligatorio [17], es importante caracterizar el inóculo en términos de parámetros fisicoquímicos para identificar el contenido de biomasa activa (SV/ST) y su capacidad de producción de CH₄ [36].

Los ensayos PBM se aplican con diversos propósitos, siendo los más significativos la evaluación del rendimiento del digestor, análisis del ciclo de vida e inventarios de GEI, entre otros. Es importante comprender cómo los parámetros experimentales influyen en los resultados y determinar la aceptabilidad de estos para realizar extrapolaciones [36].

1.1.3. Análisis del ciclo de vida

La gestión de los RA es una preocupación ambiental y social de importancia en todo el mundo, su inadecuado tratamiento puede provocar una serie de problemas, tales como la emisión de GEI, la contaminación de los cuerpos hídricos, suelo y aire [37]. Actualmente, existen diversas herramientas para estimar el impacto sobre los ecosistemas tales como: la matriz de Leopold, evaluación de impacto ambiental, análisis de riesgos ambientales, análisis de sostenibilidad y el análisis de ciclo de vida (ACV) [38].

El ACV consiste en evaluar los efectos ambientales de un producto desde su origen en las fuentes de recursos primarios hasta su consumo y disposición final. Esta metodología trasciende los límites de la planta de producción, la identificación de impactos en diversos aspectos del entorno ambiental [39]. En muchos casos, estos impactos inducidos pueden ser más significativos que los generados durante la fabricación del producto [40]. Su prioridad funcional es la de conocer donde se encuentran las etapas o elementos más críticos del proceso y así poner foco en ellos para posteriormente buscar soluciones alternativas [41].

El ACV se posiciona como una herramienta fundamental para la gestión ambiental y el diseño de procesos menos contaminantes. Ha sido incorporado en el desarrollo de los sistemas de eco-etiquetado, en la formulación de guías para el desarrollo de “productos ambientalmente favorables” y en las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) [42]. Según las normas ISO 14040 e ISO 14044, no existe un método único para realizar un ACV [23].

La norma UNE- EN ISO 14040:2006, representa un estándar a nivel internacional que establece los principios y el marco general necesario para llevar a cabo el ACV. Este enfoque posibilita la evaluación de las cargas ambientales asociadas a un producto o proceso. En paralelo, la norma UNE- EN ISO 14044:2006, complementa este marco al proporcionar requisitos detallados que guían la ejecución adecuada del ACV [43,44].

Un estudio bajo este enfoque cuenta con un proceso sistemático compuesto de 4 fases de acuerdo con la norma técnica: 1) definición del objetivo y el alcance: se define el objetivo y la aplicación proyectada del estudio, definiendo además la extensión en concordancia con las restricciones del sistema y la función principal; 2) análisis del inventario: durante esta fase, se adquieren los datos y los métodos de cálculo esenciales para medir las entradas del sistema, seguido de la contabilización de todas las emisiones que ejercen un impacto significativo en el proceso; 3) evaluación de impactos: el inventario de entradas y salidas se convierte en indicadores de impactos ambientales potenciales para el medio ambiente, la salud humana y la disponibilidad de recursos naturales, con el fin de determinar su importancia. Para analizar los datos y realizar valoraciones, se utiliza una metodología basada en eco-indicadores, que son números que miden los impactos ambientales generados en un proceso; 4) interpretación: se analiza los resultados del análisis de inventario y evaluación del impacto para la toma

de decisiones respecto al proceso, producto o servicio como se muestra en la **Figura 1** [16,40,44].

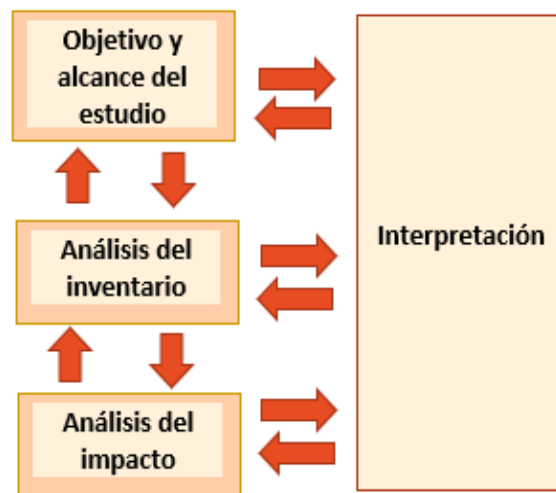


Figura 1. Esquema de metodología de ACV
Fuente: UNE-EN ISO 14040 (2019) [44].

1.1.3.1 *SimaPro, método ReCiPe y base de datos para el ACV*

Para llevar a cabo un ACV, se utilizan el software SimaPro que evalúa de manera objetiva los impactos ambientales de productos y servicios, respaldado por estándares de transparencia científica [45]. Este cuenta con una base de datos para el inventario de ciclo de vida (ICV), de los que destaca Ecoinvent v3, Agri-footprint y ELCD. Asimismo, utiliza varios métodos de evaluación de impacto ambiental, tales como: ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML – IA, entre otros [46].

1.1.3.2 *Estudios Previos utilizando el enfoque de ACV*

Respecto a los estudios basados en el enfoque de ACV en países desarrollados. Rumaihi et al. en 2020, evaluaron en Qatar el impacto ambiental de la gestión de RA mediante dos técnicas de compostaje, con el software SimaPro. Los escenarios fueron compostaje en hileras y digestión anaerobia, donde los resultados muestran que los impactos de la evaluación ambiental fueron los más altos en el compostaje en hileras para la categoría de impacto de acidificación ($9,39 \times 10^{-1}$ kg SO₂ eq). Mientras que para el compostaje combinado con DA el impacto fue mayor para la categoría de impacto de toxicidad humana ($3,47 \times 10$ kg 1,4- DB eq) [21].

Por otro lado, un estudio en Irlanda, evaluó los impactos ambientales al sustituir desechos de alimento por materias primas convencionales en la DA. Usando SimaPro y el método ReCiPe, se demostró que esta sustitución evitó emisiones de GEI con 163.33 kg CO₂ eq. También se evidenció que el uso de RA en la DA, en lugar de depositarlos en vertederos, gestiona la fuga de nutrientes a cuerpos hídricos e inhibe impactos de eutrofización asociados a la aplicación convencional en el campo [24].

En contraste a lo anterior, los países en desarrollo como Ecuador, también se han llevado a cabo estudios para evaluar la gestión de residuos. Muñoz et al. 2020, realizaron en Manta un análisis del proceso de DA de la fracción orgánica de los RSU, donde se implementó un ACV utilizando el software SimaPro, método ReCiPe 2016 v1.1 y la base de datos Ecoinvent v3, que muestra impactos ambientales significativos en las categorías de agotamiento de ozono estratosférico, la eutrofización del agua y escasez de recursos minerales [47].

El número de estudios de la gestión ambiental de los RA en la Amazonía Ecuatoriana implementando ACV es limitado. Un estudio en la ciudad del Puyo evaluó 4 diferentes escenarios de gestión de residuos como 1) relleno sanitario; 2) reciclaje + relleno sanitario; 3) compostaje + reciclaje + relleno sanitario; 4) DA + compostaje + reciclaje. Para la evaluación ambiental se empleó la metodología de ACV, tomando como unidad funcional una tonelada de residuos sólidos municipales, cuyos resultados determinaron que el escenario cuatro tuvo una reducción en calentamiento global, efectos carcinógenos, efectos respiratorios, acidificación, consumo de minerales y combustibles fósiles, mostrándose como la más favorable alternativa en términos ambientales [48].

1.2. Planteamiento del problema

En la actualidad, el Programa de Manejo de Residuos Sólidos No Peligrosos (PMD-01) contemplado en el marco del plan de prevención y mitigación de impactos de la Universidad Regional Amazónica Ikiam (URAI) ha implementado estrategias para gestionar los RA, como el almacenamiento temporal, compostaje y el envío de los residuos inorgánicos al relleno sanitario de la ciudad de Tena. A pesar de los esfuerzos realizados, se evidencia la falta de una actualización y monitoreo del plan de gestión [23]. Los RA, especialmente los residuos de frutas y verduras, exhiben una velocidad de degradación mayor debido a su considerable contenido de humedad y materia orgánica, esto desencadena desafíos como la generación de olores desagradables, GEI, fuga de

nutrientes a cuerpos hídricos y riesgos para la salud [49]. Además, la falta de caracterización y cuantificación de los RA dentro del campus dificulta la implementación de posibles estrategias efectivas para su gestión.

1.3. Justificación de la investigación

En la actualidad la URAI cuenta con un sistema de DA para el tratamiento de aguas residuales, pero carece de un sistema similar para el tratamiento de los RA. Los potenciales beneficios que podría brindar la implementación de un sistema DA aún no han sido estudiados a fondo como una alternativa de gestión. Si bien es cierto la gestión de RA por medio de compostaje tiene beneficios, también presenta desafíos. Es por esto que, en marco de esta investigación, el estudio de ACV permitirá una comprensión más holística y detallada de los impactos ambientales asociados con las distintas etapas del manejo de los RA, facilitando así la toma de decisiones informadas para mejorar la sostenibilidad en este aspecto específico de la gestión de residuos sólidos no peligrosos (PMD-01) de la URAI.

La actividad que se pretende desarrollar en este estudio se enmarca en un campo de investigación relativamente reciente, que también se está extendiendo de forma continua y rápida a países en desarrollo. Esto permite tener una visión de los problemas actuales de la sociedad y permite generar alternativas desde un punto de vista técnico, en este caso desde la biotecnología ambiental. Este análisis considera únicamente la disposición final de la gestión de los RA, excluyendo la generación, transporte y almacenamiento de residuos, comparando dos escenarios: compostaje que se realiza en la actualidad y una posible alternativa de gestión, la digestión anaerobia. A pesar de que esta herramienta ya está implementada en Ecuador, hasta el momento no existen estudios empleando el enfoque ACV en la amazonia a nivel de un campus universitario.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General

- Comparar el sistema de gestión actual de los residuos alimenticios, desde una perspectiva ambiental, respecto a una potencial alternativa, digestión anaerobia.
-

1.4.2. Objetivos Específicos

- Cuantificar la generación de residuos alimenticios y la composición de sus elementos principales generados en puestos de comida en la URAI.
- Determinar las entradas y salidas de los sistemas de gestión para la elaboración del inventario de análisis de ciclo de vida, mediante datos experimentales y bibliográficos.
- Desarrollar un análisis de ciclo de vida de la gestión de residuos alimenticios por medio de digestión anaerobia y compostaje en el contexto de la URAI.

CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO

La metodología de esta investigación se estructuró en dos fases complementarias. Una fase experimental en la que se tomaron datos de la cantidad y características físico-químicas de los RA. Con respecto al compostaje en vista de no existir una metodología estandarizada por parte del plan de gestión de la URAI, se utilizaron los datos generados por los estudiantes y docentes de la carrera de Agroecología complementada con bibliografía que señala que una tonelada de RA genera 400 kg de compost es decir que se tomó en cuenta una fracción compostable del 40% [50,51]. Simultáneamente, se llevó a cabo un análisis PBM, para cuantificar la cantidad de metano máximo producido. Los datos de la fase experimental se tomaron en cuenta para implementarlos a la fase de análisis del ACV, extrapolándolos a una tonelada como unidad funcional.

2.1 Sitio de muestreo

El estudio se llevó a cabo en la URAI ($0^{\circ}57'03.1''S$ $77^{\circ}51'43.7''W$), Ecuador, provincia de Napo – Cantón Tena ver **Figura 2**. Haciendo uso de sus instalaciones, incluyendo el Laboratorio de Enseñanzas de Química 2, para el ensayo PBM y el área actualmente dedicada a la producción de compostaje para el levantamiento de línea base de los RA. Esta investigación se enfocó en dos escenarios: compostaje (S1) y digestión anaerobia (S2) para el ACV.



Figura 2. Esquema del sitio de estudio
Realizado por: Guevara Ruth, 2024

2.2 Fase experimental

2.2.1 Delimitación del expendio de RA

Se elaboró un padrón de puestos de comida (PDC) alrededor de la URAI tomando en cuenta el bar universitario. Un PDC se considera un sistema de ventas al consumidor que ofrece una variedad de opciones gastronómicas, que generan residuos alimenticios considerados inevitable [5]. Se identificaron cinco PDC distribuidos, cuatro en la parte cercana al edificio central y uno que contempla el comedor universitario.

2.2.2 Encuestas generación de RA

Se aplicó una encuesta de 21 preguntas que se muestra en el **Anexo 1** con el objetivo de identificar si los encargados tienen conocimiento acerca de la gestión de RA en la universidad, características y cantidades que se generan en su local.

2.2.3 Recolección, cuantificación y clasificación de los RA

Para llevar a cabo la recolección y cuantificación de los RA generados en los PDC, se procedió a entrevistar a cada encargado de estos establecimientos, para solicitar su autorización. La recolección de RA se repitió a lo largo de dos periodos académicos durante 134 días, se llevó un registró de los pesos generados en kg, con apoyo y asistencia de docentes y estudiantes de la carrera de Agroecología de la URAI, ver **Anexo 2**. Para llevar a cabo dicha tarea, se contó con el uso de una balanza, guantes y mascarillas para garantizar las medidas de bioseguridad. Los datos generados se tabularon utilizando el software Minitab21.4.2.0, para posteriormente analizarlos.

La clasificación de los residuos se llevó a cabo durante 12 semanas los días miércoles y viernes, en el sitio de disposición temporal dentro del campus universitario a fin de conocer los RA más frecuentes; se separaron los residuos por subproductos y con ayuda de una balanza se procedió a su pesaje. La composición de los elementos de los RA fue expresada en % (m/m) cada uno de los subproductos se determinó en base a la Ecuación 1 [48]. Los valores obtenidos fueron registrados en una hoja de registro de Microsoft Excel 2021.

$$PS = \left(\frac{GL}{G} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde:

PS = porcentaje del subproducto considerado

GL= cantidad de subproductos en kg

G = cantidad total de muestra en kg

2.2.4 Acondicionamiento de muestras

Con el objetivo de obtener una muestra representativa de RA que mantuviera sus características físicas, químicas y microbiológicas intactas durante un período suficiente para garantizar resultados comparables; se implementaron los siguientes pasos: se tomó una porción de RA de 5kg, se redujo el tamaño a fragmentos pequeños < 0.5 cm, se homogeneizó la muestra y se procedió a realizar dos cuarteos consecutivos. El cuarteo consistió en dividir la muestra en cuatro partes iguales. Se descartó las 2/4 partes opuestas diagonalmente, y el remanente se sometió nuevamente a un cuarteo hasta obtener 1,25 kg de RA que constituyó la muestra final, este se colocó en una bolsa ziploc debidamente etiquetada para su posterior análisis. Por otro lado, se estabilizó y activo el inóculo climatizándolo durante 3 días antes de los ensayos, siguiendo la metodología de Contreras, (2017) [52].

2.2.5 Análisis de sólidos totales de inóculo y sustrato

Inicialmente, se preparó seis crisoles de 30 ml, los cuales se colocó en una mufla JP Selecta 2200854 a 550 °C durante 1 h. Luego, se trasladó los crisoles a un desecador durante 40 min hasta que alcance la temperatura ambiente, para registrar los pesos de los crisoles vacíos se utilizó una balanza analítica. Posteriormente, se agregó 10 ml de estiércol vacuno (EV) en tres crisoles y 5,12 g de RA en los tres crisoles restantes. Se pesó y se colocó en la estufa Thermo Scientific Heratherm a 105 °C aproximadamente por el lapso de 24 h. Al concluir este proceso, se llevó los crisoles al desecador durante 40 min antes de pesarlos nuevamente con la muestra seca [53]. La cantidad de sólidos totales presentes en la muestra se determinó utilizando la Ecuación 2, con los valores registrados en gramos (g).

$$\text{Sólidos totales } \left(\frac{g}{L}\right) = \frac{A - B}{C} \quad (2)$$

Donde:

A= Peso del crisol más la muestra seca a 105 °C (g)

B= Peso del crisol vacío (g)

C= Volumen de la muestra en litros (L)

2.2.6 Análisis de sólidos volátiles de inóculo y sustrato

Para llevar a cabo este análisis, se empleó los crisoles que contenían las muestras previamente secadas en el procedimiento anterior. Se utilizó una mufla JP Selecta 2200854 para llevar a cabo la calcinación de las muestras a 550 °C durante 2 h. Una vez finalizada la etapa de calcinación, se colocó los crisoles dentro de un desecador durante 40 min, y para evitar cualquier rebote de la tapa debido al efecto del aire caliente se la cerró la parcialmente [53]. La cantidad de sólidos volátiles se calculó mediante la Ecuación 3.

$$\text{Sólidos volátiles } \left(\frac{g}{L}\right) = \frac{A - D}{C} \quad (3)$$

Donde:

A= Peso del crisol más la muestra seca a 105 °C (g)

C= Volumen de la muestra en litros (L)

D= Peso del crisol con la muestra calcinada

2.2.7 Determinación porcentaje de cenizas en inóculo y sustrato

Siguiendo los pasos del procedimiento anterior, se calculó el porcentaje de cenizas utilizando la Ecuación 4, con los valores registrados en gramos (g).

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{F - E}{G - E} * 100 \quad (4)$$

Donde:

F= Peso del crisol con las cenizas (g)

E= Peso del crisol vacío (g)

G= Peso del crisol más la muestra de RA (g)

2.2.8 Medición de pH y conductividad

Se realizó la calibración de un pH-metro Mettler Toledo Seven Compact utilizando soluciones tampón de pH 4.01, pH 7.00 y pH 9.21. Se tomaron muestras de cenizas tanto del inóculo como de RA, los cuales se mezclaron en una proporción de 1:10. La mezcla resultante se agitó durante 1 h a temperatura ambiente utilizando agitadores magnéticos en una plancha caliente Isotemp™ de la marca Fisherbrand™. Después de la agitación, se permitió que la mezcla reposara durante 30 min para garantizar una homogeneidad adecuada. A continuación, se procedió a medir el pH y la conductividad de las mezclas obtenidas. Este procedimiento se llevó a cabo por triplicado con el fin de asegurar la precisión de las mediciones. Al finalizar la medición, se enjuagó el electrodo con abundante agua [54].

2.2.9 Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

Inicialmente, para llevar a cabo el PBM, se determinó la concentración de SV del inóculo y sustrato, siguiendo los pasos del inciso 2.2.5. Se evaluaron dos tratamientos con tres repeticiones cada una, utilizando botellas de vidrio con tapa antiderrames de 319 ml volumen total. Se tomó 2/3 del volumen total, dejando un espacio de cabeza para la acumulación del biogás generado durante el proceso. Los tratamientos (T1) y (T2) que corresponden a una co-digestión se diferenciaron entre sí por la adición de un nutriente en este caso acetato de sodio esto sugerido por Filer et al. (2019), se incluyó un blanco (T3) y un control positivo (T4); se mantuvo fija la cantidad de inóculo [55].

La relación inóculo: sustrato utilizado fue de 2:1 que se muestra en la Ecuación 5 y 6, en base a los sólidos volátiles [56,57]. La dilución del inóculo se realizó considerando la relación 1:4, recomendada para estiércol vacuno (EV) [58]. El inóculo fue previamente climatizado durante 3 días para activar a la población metanógena, esto con el fin de disminuir el tiempo de arranque del reactor y garantizar una mayor producción de CH₄ [52]. La **Tabla 1**, resume los detalles de los ensayos PBM.

$$V_s = \frac{SV_i * V_T}{2 * SV_s + SV_i} \quad (5)$$

Donde:

V_s = Volumen del sustrato

SV_i = Sólido volátil del inóculo

SV_s = Sólido volátil del sustrato

V_T = Volumen total

$$V_i = V_T - V_s \quad (6)$$

Donde:

V_i = Volumen del inóculo

Tabla 1. Ensayos PBM de restos alimenticios

ID	Biomasa	Relación en base a SV	Temperatura de incubación
T1	EV : RA : NT	2 : 1	37°C
T2	EV : RA	2 : 1	
T3	EV : H ₂ O	2 : 0	
T4	EV : H ₂ O : Celulosa	2 : 1	

EV= inóculo, RA= restos alimenticios, NT= nutriente

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

Se midió el pH de cada ensayo y se le añadió bicarbonato de sodio para estabilizar el mismo, se cerraron las botellas y se colocó dos agujas hipodérmicas atravesando el septo de la botella, una permitió el ingreso de N₂ y la otra facilitó la salida del gas, llevándose consigo el O₂. Esto se hizo para generar una atmosfera inerte, se incubó los ensayos a 37 °C y el TRH fue de 30 días [29]. Los ensayos se agitaron durante 30 segundos todos los días.

2.2.10 Medición de metano

La medición del metano se llevó a cabo mediante un enfoque volumétrico basado en el desplazamiento de líquido, el cual se modificó con respecto al método convencional [59]. Se implementó una probeta de 50 ml invertida, un cristalizador, una solución alcalina NaOH 0.1 M y un soporte universal, estableciendo así un sistema de desplazamiento

ver **Figura 3**. En este sistema, el biogás generado en los frascos se recogió mediante agujas hipodérmicas conectadas a jeringas de 15 ml, las cuales atravesaron el septo de los frascos, provocando una despresurización del sistema, este proceso se repitió las veces necesarias hasta que la presión del biogás disminuyó y detuvo el desplazamiento del émbolo. Posteriormente, el biogás recolectado en la jeringa se lo burbujeó en la solución alcalina NaOH 0.1 M con pH>12, permitiendo la captura de CO₂ y como indicador la fenolftaleína [60]. El líquido desplazado se consideró como el volumen de metano producido durante el experimento.



Figura 3. Sistema de medición por desplazamiento volumétrico
Fotografía tomada por: Guevara Ruth, 2024

Para extrapolar la cantidad de metano generado en los tratamientos se utilizó la Ecuación 7 propuesta por Fei et al. (2021), quien evaluó el ciclo de vida de dos procesos de eliminación de residuos alimenticios basados en digestión anaerobia [61].

$$V_1(m^3) = (M * VS) * P_1 \quad (7)$$

Donde

V_1 = volumen del metano generado (m³)

M= masa de RA

VS= porcentaje de sólidos volátiles (%)

P_1 = volumen de metano (mlCH₄/gSV)

Ecuación 8, para sacar porcentaje de sólidos volátiles.

$$\%SV = \frac{m_s - m_i}{m_H} * 100 \quad (8)$$

Donde

%SV = Porcentaje de sólidos volátiles de la muestra (%)

m_s = Masa muestra seca (g)

m_i = Masa incinerada (g)

m_H = Masa muestra húmeda (g)

Para la validación del ensayo PBM se tomó en cuenta lo siguiente si el valor del PBM del grupo control (T4) esta entre el 85 y 100% del valor teórico del sustrato estándar es decir la celulosa (352 ml CH₄/gSV – 414 ml CH₄/gSV) se valida el PBM [71].

2.2.11 Análisis de ácidos grasos volátiles por titulación.

Inicialmente, se centrifugó 25 ml de muestra en tubos Falcon de 50 ml a 4 000 rpm durante 30 min a 4 °C. Después de este proceso, se tomó una cantidad de 18 ml del sobrenadante y se colocó en un vaso de precipitación equipado con un agitador magnético en una plancha de calefacción a movimiento lento. A continuación, se introdujo el electrodo del pH-metro Mettler Toledo Seven Compact para llevar a cabo la medición del pH [62].

Para ajustar el pH=3, se realizó una titulación con HCl 0.1 M, registrando el consumo como X. Una vez completado este ajuste, dentro de una cabina de extracción de gases se utilizó una plancha de calentamiento a su máxima temperatura para infringir calor a los vasos de precipitación tapados con papel aluminio agujereado. Posteriormente, se contabilizaron 3 min desde la aparición de la primera burbuja de ebullición, momento en el cual se interrumpió el calentamiento. Se esperó durante 2 min adicionales, se ajustó el pH=6.5 mediante una titulación con NaOH 0.1 M, y se registró el consumo como Y, ver **Figura 4** [62].



Figura 4. Ajuste de pH con HCl 0.1 M y NaOH 0.1 M.
Realizado por: Guevara Ruth, 2024

Las concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV), la conversión de acidez volátil a mg DQO/l y la acidez total, se calcularon utilizando las Ecuaciones 9, 10 y 11, respectivamente [62].

$$Acidez\ volátil\ (AGV)\left(\frac{meq}{l}\right)_{AGV} = \frac{Y\ (ml) * 0.1\left(\frac{meq}{ml}\right)}{Vol.\ muestra\ (ml)} * 10000 \quad (9)$$

$$Acidez\ volátil\ \left(AGV, mg\ \frac{DQO}{l}\right)_{AGV} = AGV\left(\frac{meq}{ml}\right) * 100 \quad (10)$$

$$Acidez\ total = \frac{X(ml) * 0.1\left(\frac{meq}{ml}\right)}{Vol.\ muestra\ (ml)} * 1000 \quad (11)$$

2.3. Fase de análisis de ciclo de vida ACV

Según las Normas ISO 14040/14044, la metodología del ACV considera cuatro etapas que son abordadas a continuación. Se utilizó el software SimaPro 9.4.0, el método ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint / Endpoint y para proporcionar los datos de referencia Ecoinvent V3 [45]. La selección de este software se debió a la amplia literatura existente aplicada para estudios previos en esta área [46].

2.3.1 Objetivo, alcance y límite del estudio

El objetivo del estudio es medir los impactos ambientales de los RA donde se toma en cuenta la disposición final, excluyendo las etapas de transporte, construcción de instalaciones y consumo energético [41]. Se plantearon dos escenarios; gestión actual de RA dentro de la URAI mediante compostaje (S1) y un escenario alternativo en ausencia de oxígeno, DA (S2) que fueron comparados entre sí. La unidad funcional se estableció como 1ton [46]. En la **Figura 5** se muestra el límite del estudio.

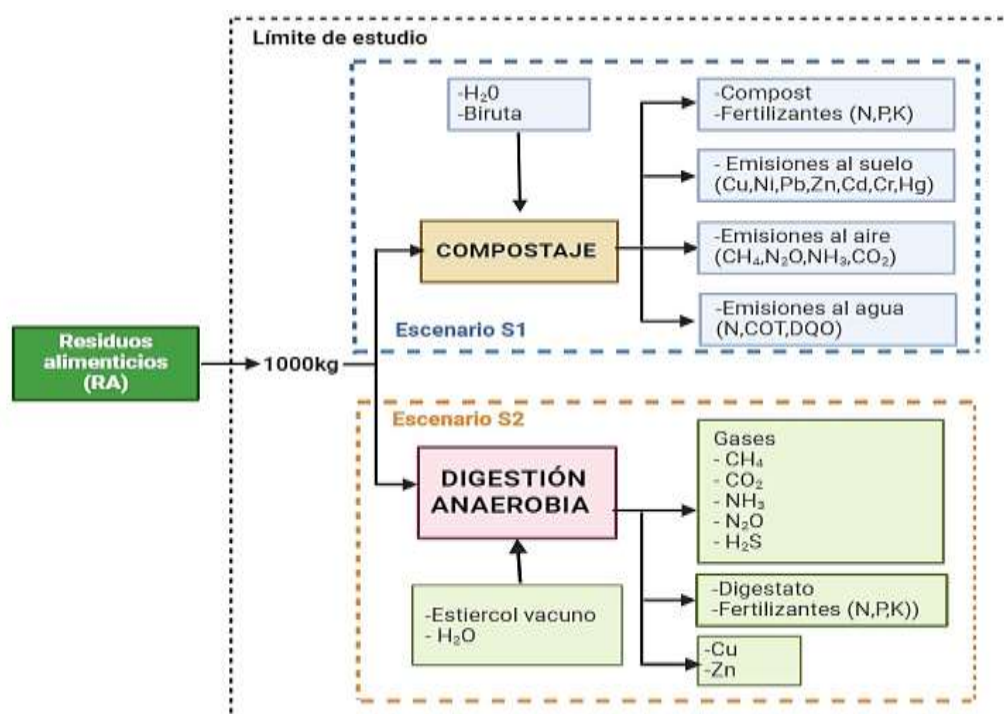


Figura 5. Límite del sistema para escenarios compostaje y digestión anaerobia
Realizado por: Guevara Ruth, 2024

2.3.2 Generación de inventario

Los datos utilizados en el desarrollo del inventario de ciclo de vida (ICV) se obtuvieron de la fase experimental de esta investigación acompañada de datos de estudios previos. Las entradas y salidas fueron cuantificadas en base a la unidad funcional. También se identificó los flujos involucrados en el modelo del ciclo de vida de los RA en análisis como los subproductos, emisiones al aire, agua y suelo [63].

Para las entradas y salidas del escenario S1, se tomó de referencia una fracción compostable del 40% [51]. En la **Tabla 2** se muestra la masa de compost que se puede generar a partir del pesaje total de 6 981,4 kg de RA-en la URAI y para el ACV a partir de una tonelada.

Tabla 2. Compost generado a partir de la masa total de RA-URAI y masa de la unidad funcional para el ACV

	Masa de RA (kg)	Fracción compostable	Compost (kg)
RA-URAI	6981,4	0,4	2792,56
ACV	1000	0,4	400

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

La **Tabla 3** muestra los volúmenes de CH₄ y CO₂ en m³ que fueron extrapolados con la Ecuación 7, tomando en cuenta una tonelada, se tomó la proporción generada de CH₄ que corresponde al 60% y de CO₂ al 40%. Para el ACV se tomó los volúmenes de CH₄ y CO₂ generados por el tratamiento 1 (T1) que fue el de mejor rendimiento.

Tabla 3. Volumen de CH₄ y CO₂ extrapolados a 1 tonelada como unidad funcional para el ACV

	ACV (m ³ CH ₄)	ACV (m ³ CO ₂)	ACV (m ³ biogás)
T1	73,74	49,16	122,90

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

Los valores detallados del inventario se muestran en la **Tabla 4 y 5** de los escenarios S1 y S2.

Tabla 4. Inventario de entradas y salidas del escenario compostaje S1 basadas en 1 tonelada

Sistema	Entradas	Cantidad	Unidad	Fuente
Compostaje (S1)	Residuos alimenticios	1000	kg	DE
	Agua	35	kg	[51]
	Biruta (Aserrín)	1,5	kg	DE
	Salidas	Cantidad	Unidad	Fuente
	Compost	400	kg	DE
	Residuos del compostaje	0,5444	kg	[48]
	Nutrientes			
	Fertilizante NH ₄ -	0,048	kg	[64]
	Fertilizante P	0,006	kg	[64]
	Fertilizante K	0,746	kg	[64]
	Emisiones al suelo			
	Cobre (kg)	0,0088	kg	[64]
	Níquel (kg)	0,0051	kg	[64]
	Plomo (kg)	0,0134	kg	[64]
	Zinc (kg)	0,0280	kg	[64]

Salidas	Cantidad	Unidad	Fuente
Cadmio (kg)	0,0001	kg	[64]
Cromo (kg)	0,0074	kg	[64]
Mercurio (kg)	0,0000	kg	[64]
Emisiones al aire			
CH ₄	0,908	m ³	[21]
N ₂ O	0,0372	kg	[21]
NH ₃	0,201	kg	[21]
CO ₂	3	m ³	[50]
Emisiones al agua			
N total	0,0109	kg	[48]
COT	0,0459	kg	[48]
DQO	0,139	kg	[48]

DE=Dato experimental

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

Tabla 5. Inventario de entradas y salidas del escenario S2, basadas en una unidad funcional de 1 tonelada

Sistema	Entradas	Cantidad	Unidad	Fuente
Digestión Anaerobia (S2)	Residuos alimenticios	1000	kg	DE
	Agua	687,2	kg	[65]
	Estiércol vacuno	210,51	kg	DE
	Salidas	Cantidad	Unidad	Fuente
	Metano CH ₄	73,74	m ³	DE
	Dióxido de carbono CO ₂	49,16	m ³	DE
	Digestato	850	kg	[21]
	Fertilizante N	49,39	kg	[66]
	Fertilizante P	16,75	kg	[66]
	Fertilizante K	5,27	kg	[66]
	NH ₃	0,24	kg	[67]
	N ₂ O	0,015	kg	[68]
	H ₂ S	0,0082	kg	[67]
	Cu	0,00839	kg	[48]
	Zn	0,02404	kg	[48]

DE=Dato experimental

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

2.3.3 Evaluación del impacto ambiental

Una vez recopilado los datos de entrada y los flujos masicos de salida para los dos escenarios, se utilizó el método ReCiPe Mindpoint para estimar las categorías de impacto, tales como: calentamiento global; agotamiento de ozono estratosférico; formación de partículas finas; acidificación terrestre; escasez de recursos fósiles.

Mientras que para el método Endpoint se consideraron: salud humana; ecosistemas y recursos [69].

2.3.4 Interpretación de Resultados

Se analizaron los impactos ambientales generados en los procesos del sistema de gestión de los RA. La interpretación de resultados implicó el análisis de los Mindpoint y Endpoint, abordando las categorías anteriormente mencionadas que se alinean con los objetivos previamente establecidos. Se examinaron las gráficas y se discutió sobre los datos obtenidos. Se compararon los dos escenarios S1 y S2 lo cual permitió identificar cual generó mayor impacto ambiental y potenciales cargas evitadas.

CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS

3.1 Resultados de la encuesta inicial

Se determinaron factores tales como: el conocimiento de los responsables acerca de los RA generados, la frecuencia con la que realizan una clasificación y su conocimiento acerca de planes de manejo dentro de la URAI.

3.1.1 Preguntas relevantes

a. ¿Qué tipo de residuo genera?

En base a la encuesta realizada a los 5 responsables de los PDC de la URAI, se observa en la **Figura 6** que el 100% genera restos de comida; el 60% genera bagazo y cáscaras de frutas. Finalmente, el 80% generan cáscaras de huevos, verduras y hortalizas.

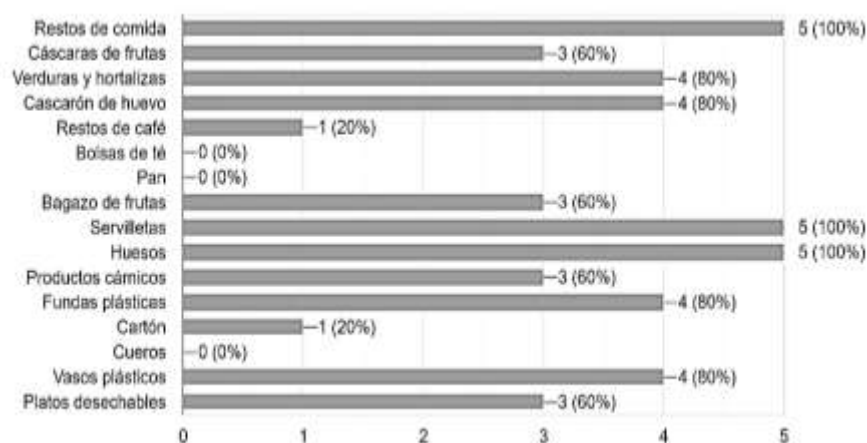


Figura 6. Tipo de residuo que generan los PDC en la URAI.

Elaborado por: Guevara Ruth, 2024

b. ¿Dónde deposita los residuos que usted produce?

Los responsables de los PDC muestran un 80% de preferencia por utilizar fundas plásticas, baldes y el contenedor del GAD de Tena ubicado en la URAI, para depositar sus residuos.

c. ¿Qué cantidad en libras (lb) de residuos orgánicos genera diariamente?

En cuanto a la cantidad diaria de RA generados por los PDC, el puesto de comida 1, asociado al bar PDC1, junto con el PDC3 y PDC4, estiman que generan entre 20 y 25 libras diarias de RA. Por otro lado, el PDC 2 estima una generación de entre 1 y 5 libras, mientras que el PDC5 estima una cantidad de entre 5 y 10 libras de RA.

d. ¿Con que frecuencia clasifica o separa los residuos sólidos de su negocio en orgánicos e inorgánicos?

El responsable del PDC1-Bar manifiesta que siempre realiza una clasificación de los residuos sólidos en orgánicos e inorgánicos. Por otro lado, el responsable del PDC2 menciona que nunca lleva a cabo esta clasificación, en el PDC3 y PDC4 la clasificación se la realiza de forma regular, finalmente el responsable del PDC 5 menciona que casi nunca se clasifican los residuos.

e. ¿Con qué frecuencia ha escuchado que los residuos producidos en la universidad son aprovechados (reciclados/reutilizados/compostados)?

En su mayoría los responsables de los PDC mencionan que no han escuchado de forma recurrente sobre la gestión de los RA dentro de la URAI.

f. ¿Cómo evalúa el sistema que usa la universidad para desechar los residuos?

El PDC1 lo considera como moderadamente satisfactorio. En contraste, el PDC2, PDC4 y PDC5 lo califican como poco satisfactorio. Finalmente, el PDC3 lo describe como regular.

3.2 Clasificación y cuantificación de los pesos generados de RA

Durante 12 semanas etapa en la que se dio el proceso de caracterización se realizaron muestreos los días (miércoles y viernes). Los desechos más frecuentes corresponden a cáscara de plátano verde (145 kg), cáscara de papa (141 kg) y cáscara de plátano maduro (133 kg). Asimismo, se observó una destacada generación de cáscara de yuca, alcanzando los 131 kg. Además, se clasificaron los RA en lignocelulósicos y no

lignocelulósicos, detallando esta clasificación en la **Tabla 6**. Estos hallazgos ofrecen una visión de la composición y la predominancia de los RA.

Tabla 6. Clasificación de los RA en según su peso y su característica lignocelulósica

Masa (kg) de RA durante el periodo octubre 2023 - febrero 2024	1055 kg		LC	No LC
Tipo de RA	kg	%	—	—
Plátano verde	45	4,27	X	
Plátano maduro	31	2,94	X	
Yuca	25	2,37	X	
Zanahoria	12	1,14		X
Col	14	1,33	X	
Col morada	9	0,85	X	
Coliflor	12	1,14		X
Brócoli	8	0,76		X
Cáscaras de papaya	9	0,85	X	
Tomate de árbol	12	1,14		X
Lechuga	7	0,66	X	
Pimiento	11	1,04		X
Cebolla perla	18	1,71	X	
Espinaca	16	1,52		X
Tomate de carne	21	1,99		X
Pepinillo	14	1,33		X
Granos de maíz	6	0,57		X
Cáscara de plátano maduro	133	12,61	X	
Cáscara de plátano verde	145	13,74	X	
Cáscara de yuca	131	12,42	X	
Cáscara de papa	141	13,36	x	
Cebolla blanca	34	3,22	X	
Mazorca de maíz	50	4,74	X	
Cáscaras de piña	34	3,22	X	
Residuos vegetales mezclados (partículas pequeñas)	10	0,95		X
Hojas de Guayusa	9	0,85	X	
Cáscara de limón	15	1,42	X	
Cáscara de naranja	18	1,71	X	
Cáscaras de maracuyá	21	1,99	X	
Alimentos cocidos	38	3,60		X
Cáscara de huevo	6	0,57		X
TOTAL	1055	100,00		

L=Lignocelulósico; No LC: No Lignocelulósico

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

En dos periodos académicos, se realizó la cuantificación de los pesos de los RA. En la **Figura 7**, se muestran los pesos acumulados de RA en los PDC; registrado de manera completa en el **Anexo 2**.

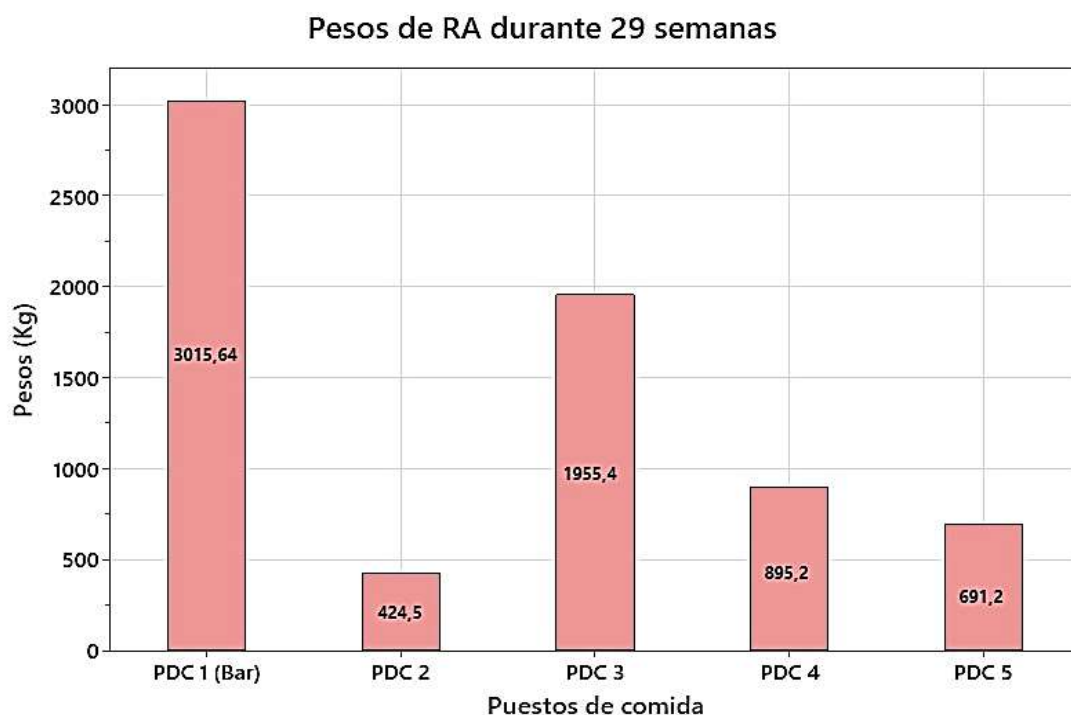


Figura 7. Restos alimenticios acumulados en los PDC durante 29 semanas de evaluación.
Realizado por: Guevara Ruth, 2024

El PDC1-Bar generó el 43,19% del total de RA generada en los 134 días, seguido por el PDC3, PDC4, PDC5, PDC2 con un 28%, 12,82%, 9,89% y 6,07% respectivamente. Estos resultados proporcionan una visión ordenada de la generación de RA que no se ha realizado anteriormente.

Las **Figuras 8-9** muestran los pesos acumulados de RA durante los períodos académico (marzo - agosto de 2023) y (octubre - diciembre de 2023) donde se destaca la producción semanal promedio de RA de cada PDC. El PDC1-Bar genera en promedio semanalmente 103,99 kg de RA, seguido por el PDC3, PDC4, PDC5, PDC2 con una generación semanal promedio de 67,43 kg, 30,87 kg, 23,83 kg y 14,5kg respectivamente.

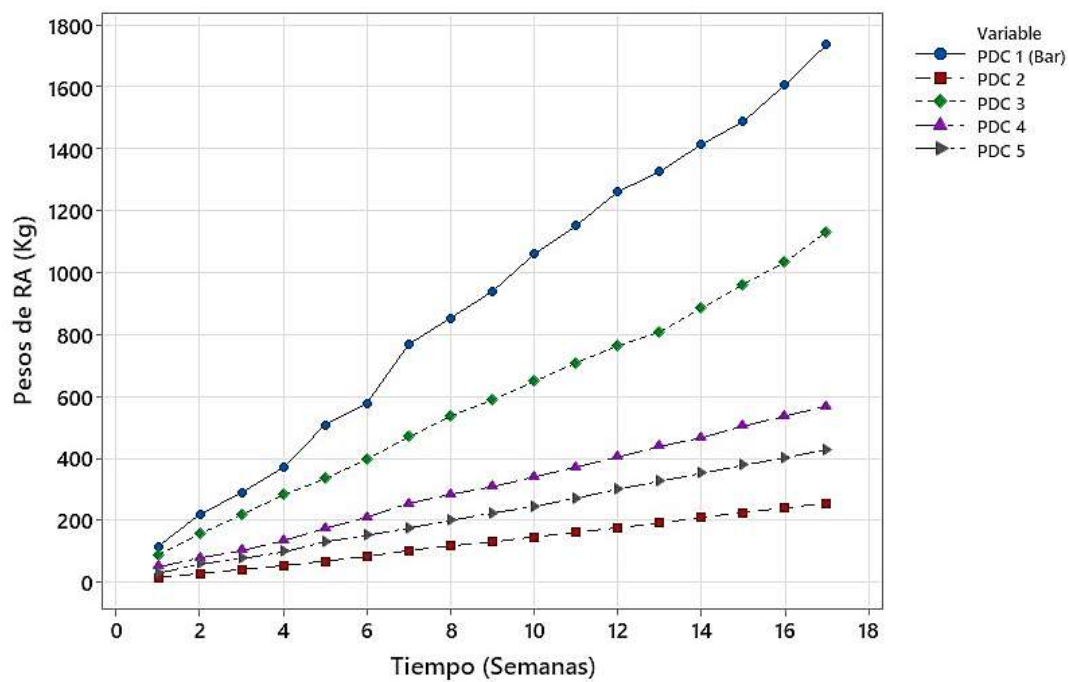


Figura 8. Pesos acumulados de RA por semana - Periodo (marzo – agosto 2023)
Realizado por: Guevara Ruth, 2024

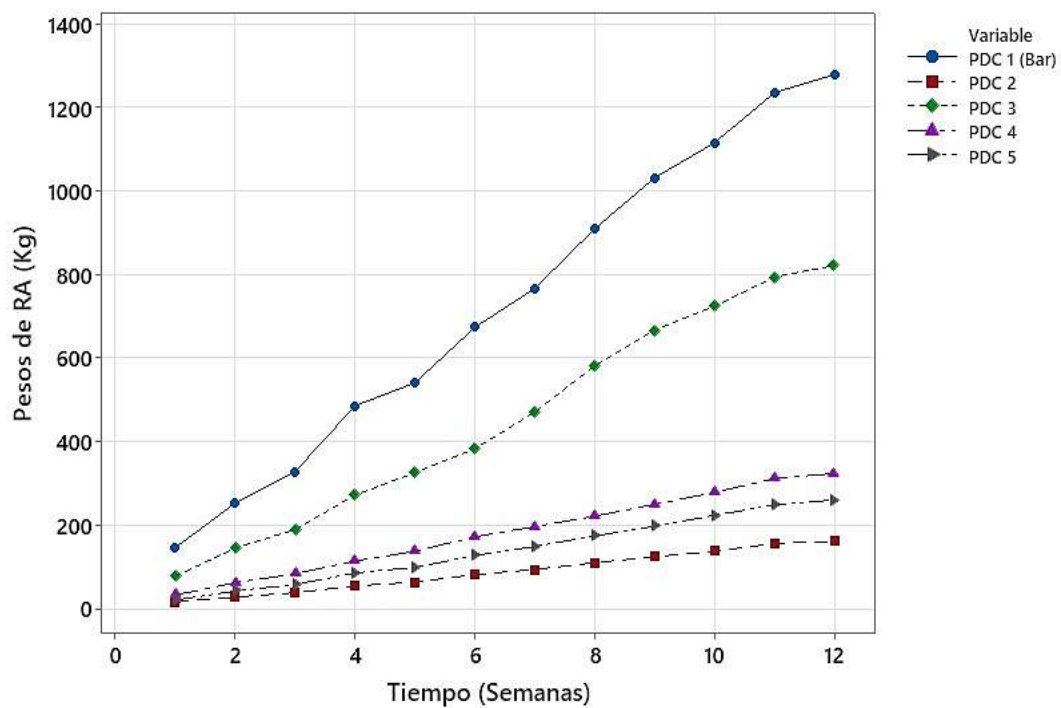


Figura 9. Pesos acumulados de RA por semana -Periodo (octubre - diciembre 2023)
Realizado por: Guevara Ruth, 2024

3.3 Caracterización de sustratos

La caracterización fisicoquímica tanto del estiércol vacuno (EV) como RA se midieron por triplicado y se muestra el promedio en la **Tabla 7**, se evidencia un pH ligeramente ácido en los RA, mientras que para el EV el pH está muy cerca a la neutralidad. Las características líquidas del EV hacen que su carga de ST y SV sean menores que los RA. En cuanto a la conductividad eléctrica se muestran valores de 3.5 ms/cm para EV y 13.49 ms/cm para RA valores que están asociados con el contenido de sólidos disueltos y la carga de nutrientes.

Tabla 7. Características fisicoquímicas de EV y RA

Parámetro	Unidad	Estiércol vacuno EV	Residuos alimenticios (RA)
Sólidos Totales	g/L	34,66	160,56
Sólidos Volátiles	g/L	29,59	128,68
Conductividad	ms/cm	3,50	13,49
pH	—	6,70	5,73

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

3.4 Producción de metano en PBM

La medición de la producción de CH₄ acumulado en ml CH₄/gSV en el ensayo PBM no reveló diferencias significativas entre los dos tratamientos ver **Figura 10**. En la **Tabla 8**, se presenta los ml CH₄/gSV acumulados durante 30 días, junto con el volumen de CO₂ y biogás.

Tabla 8. Resultados PBM experimentales

	PBM (ml CH ₄ /gSV)	PBM (ml CO ₂ /gSV)	PBM (ml biogás/gSV)
T1	578,33	385,56	963,89
T2	556,67	371,11	927,78
T3	278,33	185,56	463,89
T4	311	207,33	518,33

T1 = Tratamiento con nutriente; T2= Tratamiento sin nutriente; T3= Blanco; T4= Control

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

La **Tabla 9**, exhibe los volúmenes de CH₄, CO₂ y biogás extrapolados con la Ecuación 7 tomando en cuenta las 6,982 toneladas de RA registradas en los 134 días de pesaje.

Tabla 9. Volumen de CH₄, CO₂ y biogás generado a partir del total de RA-URAI

	m ³ CH ₄	m ³ CO ₂	m ³ biogás
RA-URAI	514,83	343,22	858,05

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

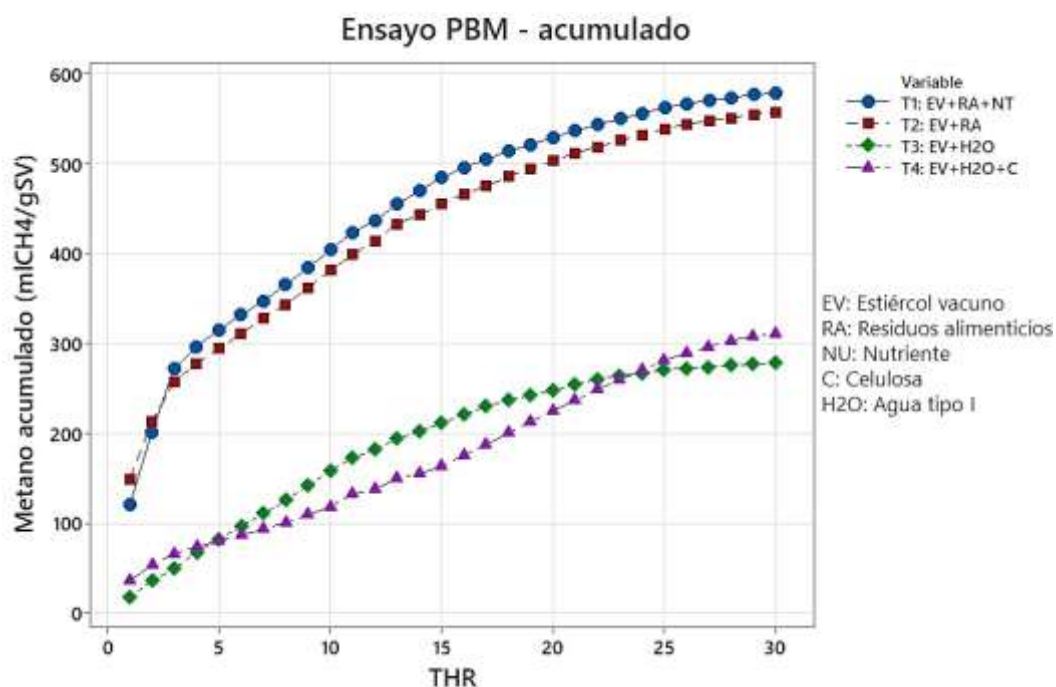


Figura 10. Producción de metano en los ensayos de PBM

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

El valor de PBM del T4 control positivo fue de 311 ml CH₄/gSV, mismo que se encuentra entre el 85 - 100% del rango teórico de la celulosa (352 ml CH₄/gSV – 414 ml CH₄/gSV). Este resultado valida la ejecución del ensayo PBM.

3.5 Ácidos grasos totales

Las concentraciones iniciales se resumen en la **Tabla 10**, mostrando un pH=7,95 para el T1 y pH=8,04 para el T2. En cuanto a los AGV, se detecta una variación significativa entre ambos tratamientos siendo el T2 más bajo. Las tendencias generales indican que los tratamientos con pH más elevado suelen tener una acidez total más alta. Sin embargo, en este caso, a pesar de que el T1 presenta un pH inferior al T2, se observa que cuenta con AGV y acidez total mayor, sugiriendo una posible estabilidad en el tratamiento.

Tabla 10. Concentración de ácidos grasos volátiles, acidez volátil y la acidez total, al inicio de la investigación.

Tratamientos	pH	AGV (meq/l)	AGV (mg DQO/l)	Acidez Total (meq/l)
T1	7,95	81,09	8109,75	105,48
T2	8,04	49,38	4938,27	66,66
T3	8,4	4,88	487,80	46,34
T4	8,18	6,09	609,75	50,00

Realizado por: Ruth Guevara, 2024

Las concentraciones finales presentan una variabilidad significativa en los parámetros evaluados, como se resumen en la **Tabla 11**. El rango de pH se sitúa entre T2 mayor que el T1. En cuanto a las concentraciones de AGV se muestra que el T1 presenta mayor actividad metabólica. Con respecto a la acidez total de igual manera el T1 posee un valor más elevado, este parámetro representa la suma de todos los ácidos volátiles y no volátiles.

Tabla 11. Concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV), acidez volátil y la acidez total, al inicio de la investigación

Tratamientos	pH	AGV (meq/l)	AGV (mgDQO/l)	Acidez Total (meq/l)
T1	6,98	49,41	4941,17	99,41
T2	7,13	20,93	2093,02	65,11
T3	8,28	5,15	515,46	46,39
T4	7,66	10,92	1091,95	101,72

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

3.6 Resultados del SimaPro

Los resultados de la evaluación de impacto del ACV para los escenarios S1 y S2, fueron normalizados para obtener gráficas que permitieron compararlos y presentarlos de una manera más comprensible. La **Figura 11** muestra las categorías de impacto con el método ReCiPe Mindpoint tales como calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico, formación de partículas finas, acidificación terrestre y escasez de recursos fósiles.

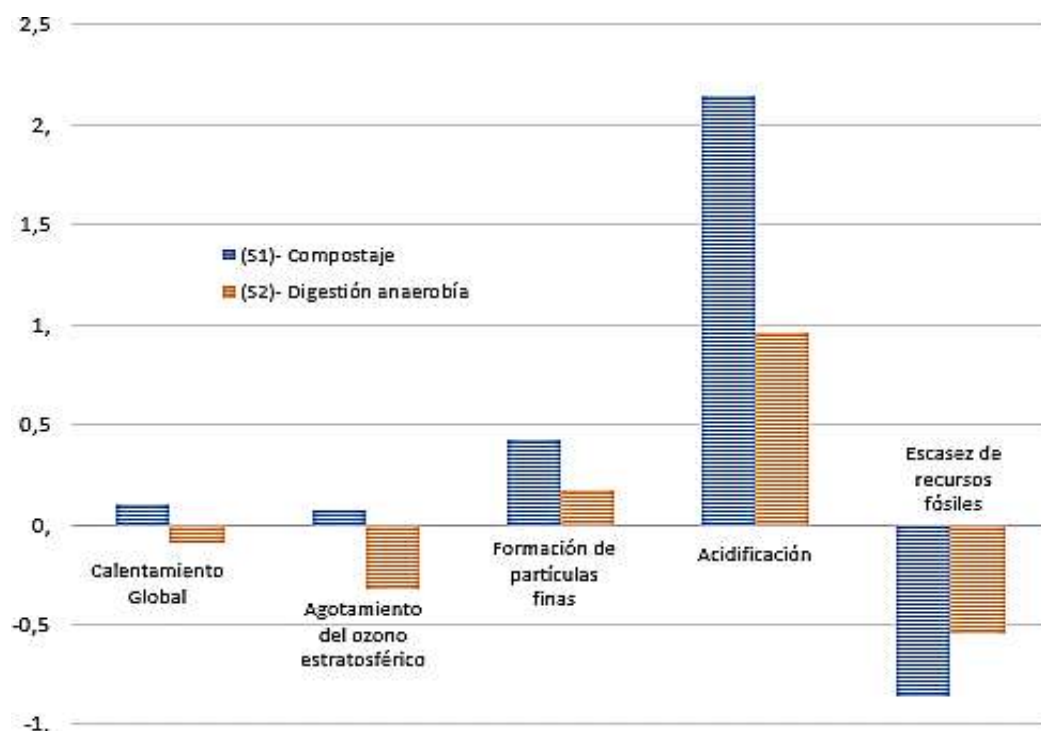


Figura 11. Impacto ambiental potencial de los escenarios S1 y S2 de la gestión de RA a través de ReCiPe MindPoint.
Realizado por: Guevara Ruth, 2024

Los resultados de la evaluación de impacto ambiental potencial, por el método ReCiPe MindPoint para los escenarios S1 y S2, se muestran en la **Tabla 12**. En la categoría de calentamiento global, ambos escenarios muestran GEI, siendo el S1 emisiones positivas de 0,106 kg CO₂ eq y para el S2 emisiones negativas de 0,0865 kg CO₂ eq lo que podría interpretarse en contribuciones menores al calentamiento global. Asimismo, en el agotamiento del ozono estratosférico, S2 exhibe una contribución menos perjudicial que S1, con 0,319 kg CFC11 eq.

En relación con la formación de partículas finas, ambos escenarios generan impactos, siendo el S1 con un aporte de 0,421 kg PM_{2,5} eq mayor que el S2. Para acidificación, el S2 muestra menor impacto potencial con 0,960 kg SO₂ eq en comparación con 2,1495 kg SO₂ eq del S1. Finalmente, en la categoría de escasez de recursos fósiles, ambos escenarios presentan valores negativos, señalando beneficios en términos de conservación recursos fósiles.

Tabla 12. Resultados numéricos de impacto potencial ambiental evaluados por el método ReCiPe MindPoint

Etiqueta	Compostaje (S1)	DA (S2)	Unidad
Calentamiento global	0,106	0,0865 ↓	kg CO ₂ eq
Agotamiento del ozono estratosférico	0,0687	0,31990 ↓	kg CFC-11 eq
Formación de partículas finas	0,4212	0,1725	kg PM _{2,5} eq
Acidificación	2,1495	0,9605	kg SO ₂ eq
Escasez de recursos fósiles	1 ↓	1 ↓	kg oil eq

↓ = Cargas evitadas

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

Los resultados obtenidos de la evaluación por ReCiPe EndPoint para S1 y S2. Se muestran en la **Figura 12**.

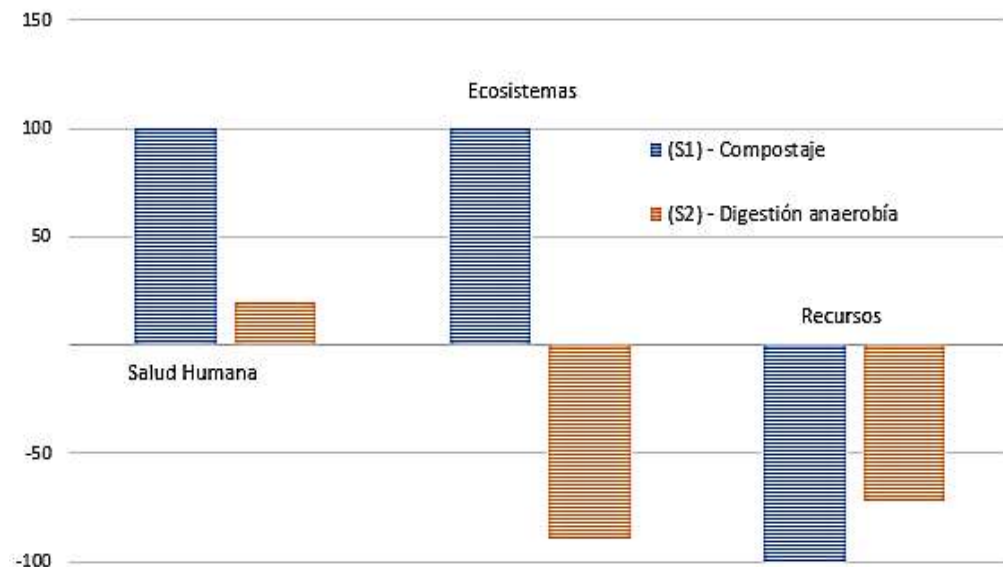


Figura 12. Impacto ambiental de los escenarios S1 y S2 de la gestión de RA a través de ReCiPe EndPoint.

Realizado por: Guevara Ruth, 2024

Las categorías de impacto ambiental son: salud humana, ecosistemas y recursos. Para salud humana, ambos escenarios representan un impacto desfavorable; sin embargo, S1 se destaca por tener un impacto cinco veces mayor con 100 DALY que el S2 con 20,0549 DALY. Además, en la categoría de ecosistemas, se observa una diferencia significativa entre S1 con 100 especies por año y S2 con -89 especies por año. Por último, en la categoría de recursos, ambos escenarios presentan valores negativos, sugiriendo que estos procesos podrían aportar con elementos utilizables para la agricultura (abonos). Dentro de la categoría de daño referente a la disponibilidad de recursos, el S1 muestra un valor de -100 en comparación con el -72 del S2.

CAPÍTULO IV: INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

4.1 Fase experimental y recolección de datos.

La realización de una encuesta detallada en los puestos de comida de la URAI resultó ser un paso crucial para comprender la magnitud de los RA generados. Los resultados obtenidos revelaron datos sobre la cantidad y composición, además resulta alentador observar la receptividad y disposición mostradas por los encargados de los PDC cuando se les planteó la necesidad de reciclar y reaprovechar los residuos. La recopilación de información de campo mediante entrevistas y pesajes complementado con ensayos experimentales en laboratorio e información bibliográfica permitió recopilar datos para extrapolarlos a la unidad funcional de una tonelada de RA y su posterior ACV. Para el caso del escenario S2 se destacó la necesidad de implementar un PBM que arroje un rendimiento acumulado de 578,33 CH₄/gSV, dato que fue extrapolado a una tonelada de RA llegando a producir 73,74 m³ de CH₄ y 49,16 m³ de CO₂, este resultado no se encuentra alejado a lo reportado por Gómez et al. (2017), donde se demostró que una tonelada de residuos provenientes de un mercado de abastos produce 61,31 m³ de CH₄ [65].

Por otro lado, un estudio realizado en China implementó un ACV del proceso de eliminación de RA combinados entre sólidos y líquidos donde se realizó un ensayo PBM previo, arrojando un rendimiento teórico acumulado de 420 ml CH₄/gSV pudiendo llegar a producir para una tonelada de RA 43,30 m³ de CH₄ [61]. Para entender las diferencias entre este estudio y estudios previos es importante tener en cuenta que el PBM se calcula como la máxima cantidad de metano acumulada, dividida por la cantidad de masa de sustrato agregado, expresado comúnmente como ml CH₄/gSV, por lo que el desarrollo de esta prueba depende en gran medida de las características del sustrato a evaluar [33,60].

4.2 Fase de análisis de ciclo de vida

Esta investigación presentó una limitación vinculada al uso de diversas fuentes de países distintos de Ecuador, para la generación del inventario de ACV. Además, el rendimiento calculado no necesariamente refleja el nivel de rendimiento que podría lograrse con los métodos de aplicación adecuados adaptados a las condiciones de la

URAI. Sin embargo, como el modelo se fue creado específicamente para esta investigación, está abierto a actualizaciones con datos reales de la URAI una vez que estén disponibles.

4.2.1 Calentamiento global

El calentamiento global en el contexto del ACV se expresa como la modificación de la temperatura media terrestre derivada de la contribución de los GEI, el impacto de los nutrientes y de emisiones CO₂ eq [69]. El CH₄ presenta un impacto significativo en la contabilidad de los GEI durante el proceso de DA. El análisis de este trabajo revela que el compostaje contribuye aproximadamente un 0,106 kg CO₂ eq a diferencia de la DA con una carga ambiental de -0.086 kg CO₂ eq; que está relacionado con la capacidad de influir en los cambios de la temperatura media mundial en la interfaz superficie-aire, parámetros climáticos y sus efectos. A pesar de esto, las cargas no son tan elevadas debido a que se hizo omisión a la etapa de recolección y transporte, es decir solo se tomó en cuenta la disposición final. El hecho de que el resultado para la digestión anaerobia resulte con un valor negativo sugiere que este proceso podría tener un impacto menos perjudicial en el forzamiento radiactivo en comparación con el compostaje [70]. Esto podría deberse a que la DA produce biogás, que puede ser capturado y utilizado como una fuente de energía renovable, lo que reduce las emisiones de GEI, a diferencia del compostaje donde se liberan gases al ambiente durante el proceso de descomposición y su captura y aprovechamiento es menos controlada.

4.2.2 Agotamiento del ozono estratosférico

El agotamiento del ozono estratosférico se produce por la disminución de la capa de ozono debido a las actividades humanas. Esto aumenta la exposición a la radiación UV, con posibles efectos negativos en la salud humana, ecosistemas, así como los recursos naturales [48]. Durante el proceso de compostaje, la materia orgánica se descompone aeróbicamente para producir compost, que pueden liberar gases como el CO₂ y el N₂O, así como pequeñas cantidades de compuestos orgánicos volátiles [71]. Los materiales compostados contienen ciertos tipos de clorofluorocarbonos o clorocarbonos, los cuales pueden ser liberados durante el proceso y contribuir al agotamiento de la capa de ozono, esta podría ser la razón de obtener un valor 0,07 kg CFC11 eq.

Por otro lado, durante la DA, se reduce la liberación de los GEI en comparación con el compostaje, ya que se produce menos N_2O [72]. Además, los procesos de digestión anaerobia pueden capturar CH_4 , que es un gas de efecto invernadero que aporta 20 veces más en su impacto ambiental que el CO_2 [73]. Al capturar y utilizar el CH_4 como una fuente de energía renovable, se puede reducir aún más la huella de carbono [74]. Por lo tanto, en el ACV, de esta investigación la DA resultó en valores negativos de $-0,3199 \text{ kg CFC11eq}$ para el agotamiento del ozono estratosférico. Estos resultados coinciden con el trabajo realizado por Di Maria y Micale. (2015), que compara DA y compostaje, para la gestión de residuos orgánicos obteniendo valores de $-3,08 \times 10^{-6} \text{ kg CFC11 eq}$ para el caso de la DA, en cambio en un escenario en el que se procesan residuos orgánicos urbanos por medio de compostaje se obtuvieron valores de $3,71 \times 10^{-6} \text{ kg CFC11 eq}$ [75].

4.2.3 Formación de partículas finas

Respecto a la formación de partículas finas tanto para el compostaje como para la DA puede llegar a ser un inconveniente ambiental de salud humana debido a las emisiones y sus precursores como NH_3 , entre otros, estas partículas microscópicas menos a 2,5 micrones de diámetro, pueden estar combinadas con otros contaminantes que afectan el sistema respiratorio humano aun en concentraciones bajas de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [76]. Por lo general estas partículas provienen de procesos de combustión, actividades industriales o fuentes naturales. También se originan como resultado de la oxidación de contaminantes gaseosos en la atmósfera y su reacción con vapor de agua [77]. Sin embargo, se han encontrado en procesos de compostaje específicamente en la etapa de volteo con emisiones de $0,0571 \text{ kg PM}_{2,5} \text{ eq}$ [41]. Investigaciones de ACV donde se mide el impacto ambiental de RA urbanos mediante DA muestra emisiones de $3.53 \times 10^{-7} \text{ kg PM}_{2,5} \text{ eq}$ [78] de igual manera en ACV de RA por compostaje muestran emisiones de $0,75 \text{ kg PM}_{2,5} \text{ eq}$ por fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos [79]. No existe información suficiente que reporte emisiones de partículas finas en el proceso de DA; sin embargo, la presencia de estas partículas se podría presentar por una inadecuada gestión de emisiones, cuando no se controla adecuadamente la combustión del biogás, cuando existen fugas que liberen partículas al ambiente o incluso condiciones climáticas como vientos que las dispersen [80].

4.2.4 Acidificación terrestre

La acidificación terrestre es provocada por la liberación de sustancias químicas ácidas en el ambiente causando acidificación del suelo y cuerpos de agua dulce. Estas emisiones dan lugar a la liberación de iones de hidrógeno (H^+) cuando los gases se mineralizan, los protones contribuyen a la acidificación del suelo. Esto puede tener efectos nocivos incluyendo la biodiversidad, daños a la vegetación y cambios en la composición del suelo. En el caso del compostaje, con 2,15 kg SO_2 eq se traduce a que podría contribuir significativamente a la acidificación del suelo y los cuerpos de agua de la URAI en comparación con la DA, que tiene un impacto de 0,96 kg SO_2 eq para el mismo indicador. La diferencia en los resultados puede atribuirse a la composición de los RA que pueden influir en la cantidad de emisiones ácidas [81]. Por otro lado, la DA, al ser un proceso en el que los materiales orgánicos se descomponen en ausencia de oxígeno, puede presentar menores emisiones de gases ácidos en comparación con el compostaje, lo que resulta en un menor impacto en la acidificación terrestre según el análisis ACV [61].

4.2.5 Escasez de recursos fósiles

El agotamiento de recursos fósiles presenta impactos beneficiosos tanto para el compostaje como para la DA con valores de -1kg oil eq, ambas contribuyen de forma favorable en la mitigación de impactos ambientales [82]. Datos similares se pudieron evidenciar en estudios donde se evaluó el ACV de desperdicios de alimentos mediante DA donde se obtuvo valores de -93,5kg oil eq/FU y - 19,4 kg oil eq/FU para biogás destinado al consumo de cocina y electricidad respectivamente [83]. En contraste Ramirez et al. (2020), informó que la sustitución de fertilizantes minerales ahorra más recursos fósiles que la misma producción evitada del consumo de energía no renovable; sin embargo, es importante considerar que esto depende de la cantidad de biogás producido en el sistema [84].

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La búsqueda de alternativas para una gestión más sostenible de residuos llevó al levantamiento de una línea base de la generación de RA en los PDC de la URAI, que no se había realizado con anterioridad. Además, es fundamental conocer la cantidad y características de los residuos, puesto que proporcionan información valiosa para la toma de decisiones al momento de implementar planes de gestión. Este trabajo comparó dos escenarios de gestión: compostaje y DA como escenario alternativo. Se determinaron las entradas y salidas de ambos escenarios para analizarlos bajo un enfoque de ACV, con el software SimaPro, método ReCiPe logrando comparar ambos escenarios e identificar en que categorías tienen mayores impactos ambientales. De las cinco categorías evaluados por MindPoint, tres de ellas revelan que la DA es ambientalmente más responsable y contribuye menos al impacto ambiental, siendo la excepción la categoría de acidificación y agotamiento del ozono estratosférico y para el EndPoint el compostaje representa un mayor impacto a la categoría de salud humana y ecosistemas. Por todo lo expuesto anteriormente, escoger a la DA como una alternativa de gestión permitiría aprovechar sus subproductos como el digestato, dado que este puede sustituir a los fertilizantes químicos, contribuyen a la reducción de dependencia de recursos no renovables y mitiga los GEI. Además, puede mejorar la calidad del suelo aportando una mayor cantidad de nutrientes que el compost que se genera actualmente en la URAI. También es importante tomar en cuenta futuros estudios que aporten alternativas de almacenamiento y aprovechamiento de biogás. Por otro lado, debido a que esta investigación es uno de los primeros acercamientos al ACV en el contexto de la URAI, se sugiere realizar más investigaciones y comparaciones como otros escenarios de tratamiento de RA, como la pirólisis u otras técnicas de compostaje, incluido el vermicompostaje.

REFERENCIAS

1. Rao JN, Parsai T. A comprehensive review on the decentralized composting systems for household biodegradable waste management. *J Environ Manage.* 2023;345: 118824. doi:10.1016/j.jenvman.2023.118824
2. FAO. The State of Food and Agriculture 2019: Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction. 2019;3: 2–8.
3. Lipinski B. SDG TARGET 12.3 ON FOOD LOSS AND WASTE: 2023 PROGRESS REPORT. 2023 Sep. Available: <https://www.champions123.org>.
4. Gustavsson J, Cederberg C, Sonesson U, Otterdijk R, Meybeck A. Global food losses and food waste - Extent, causes and prevention. FAO. 2011: 29. Available: <https://www.fao.org/home/en/>
5. Hanson C, Lipinski B, Nichols-Vinueza A, Antonioli V, Espinoza L, Kenny S, et al. Food Loss and Waste Country Progress Index A Tool to Measure National Progress on Managing Food Loss and Waste. 2022. doi:<http://dx.doi.org/10.18235/0004255>
6. United Nations Environment Programme. FOOD WASTE INDEX REPORT 2021. Nairobi; 2021.
7. Hernández Rangel SH. Desperdicio de alimentos en la alimentación escolar, currículo, hábitos y comportamientos en América Latina. Una revisión sistemática. *Voces y Silencios Revista Latinoamericana de Educación.* 2023;14: 67–90. doi:10.18175/VyS14.1.2023.13
8. Moreno L, Proaño A, Petersen S, Ortiz J. Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales. Ministerio del Ambiente y Agua. 2020: 12–30. Available: www.ambiente.gob.ec
9. MAATE. Ecuador impulsa la gestión adecuada de residuos orgánicos en las ciudades. Quito; 2020 Jul. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-impulsa-la-gestion-adecuada-de-residuos-organicos-en-las-ciudades/>
10. Cordero B, Salazar G, Yadira C, Jurado J. MAE-Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (MAE-PNGIDS). Quito; 2019 Dec. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/PNGIDS-DICIEMBRE-2018.pdf>
11. Vargas N. Propuesta de Plan de Gestión Integral para los residuos sólidos generados en la Cabecera Cantonal de Tena. UNIVERSIDAD TECNICA PARTICULAR DE LOJA. 2017. Available: <https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/20.500.11962/21200/1/Vargas%20Vargas%20Natali%20Fernanda.pdf>
12. Bernstad Saraiva Schott A, Andersson T. Food waste minimization from a life-cycle perspective. *J Environ Manage.* 2015;147: 219–226. doi:10.1016/j.jenvman.2014.07.048
13. Al Mussa Ugak M, Zahrim Yaser A, Lamaming J, Kelly Subin E, Rajin M, Saalah S, et al. Comparative study on passive aerated in-vessel composting of food wastes with the addition of Sabah ragi. *Carbon Resources Conversion.* 2022;5: 200–210. doi:10.1016/j.crcon.2022.05.004
14. Růžicková J, Raclavská H, Šafář M, Koval' S, Juchelková D, Kucbel M, et al. Fate of microplastics during composting and their leachability. *Sustain Chem Pharm.* 2022;30: 100867. doi:10.1016/j.scp.2022.100867
15. Barthod J, Rumpel C, Calabi-Floody M, Mora ML, Bolan NS, Dignac MF. Adding worms during composting of organic waste with red mud and fly ash reduces CO2 emissions and increases plant available nutrient contents. *J Environ Manage.* 2018;222: 207–215. doi:10.1016/j.jenvman.2018.05.079

16. Jimenez E. Análisis de ciclo de vida comparativo entre la deposición en vertedero y el tratamiento biológico mediante digestión anaerobia de residuos de frutas y verduras generados en mercados abiertos. Universidad de Sevilla. 2021;4: 56–78.
17. Li M, Li S, Chen S, Meng Q, Wang Y, Yang W, et al. Measures for Controlling Gaseous Emissions during Composting: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. MDPI; 2023. doi:10.3390/ijerph20043587
18. Margaritis M, Psarras K, Panaretou V, Thanos AG, Malamis D, Sotiropoulos A. Improvement of home composting process of food waste using different minerals. *Waste Management*. 2018;73: 87–100. doi:10.1016/j.wasman.2017.12.009
19. Pohland FG. DEVELOPMENTS I N ANAEROBIC STABILIZM'ION OF ORGANIC WASTES-THE TWO-PHASE CONCEPT. Georgia; 1971.
20. Stančin H, Mikulčić H, Wang X, Duić N. A review on alternative fuels in future energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;128: 109927. doi:10.1016/j.rser.2020.109927
21. Al-Rumaihi A, McKay G, Mackey HR, Al-Ansari T. Environmental Impact Assessment of Food Waste Management Using Two Composting Techniques. *Sustainability*. 2020;12: 1595. doi:10.3390/su12041595
22. AEBIOM. A Biogas Road Map for Europe Content. Belgium; 2009 Oct. Available: www.aebiom.org
23. INEN. GESTIÓN AMBIENTAL — ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA — PRINCIPIOS Y MARCO DE REFERENCIA (ISO 14040:2006, IDT). . Servicio ecuatoriano de normalización. 2018;2: 5–7.
24. Pérez-Camacho MN, Curry R, Cromie T. Life cycle environmental impacts of substituting food wastes for traditional anaerobic digestion feedstocks. *Waste Management*. 2018;73: 140–155. doi:10.1016/j.wasman.2017.12.023
25. Mata-Alvarez J, Dosta J, Romero-Güiza MS, Fonoll X, Peces M, Astals S. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;36: 412–427. doi:10.1016/j.rser.2014.04.039
26. BERNAL-MARTINEZ A. Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos. *Mujeres en la Ciencia Ciencias ambientales, uso de recursos. ECORFAN*; 2020. pp. 115–141. doi:10.35429/H.2020.8.115.141
27. Gama L, Adams R, Martínez J, Laguna C. La Digestión Anaerobia y la Bioquímica. *División Académica de Ciencias Biológicas*. 2011;XVII: 32–66.
28. FAO. Manual de biogás. Santiago de Chile; 2011.
29. Krause MJ, Chickering GW, Townsend TG, Pullammanappallil P. Effects of temperature and particle size on the biochemical methane potential of municipal solid waste components. *Waste Management*. 2018;71: 25–30. doi:10.1016/j.wasman.2017.11.015
30. Ali S, Shah TA, Afzal A, Tabassum R. Analysis of agricultural substrates for nutritive values and biomethane potential. *Curr Sci*. 2018;115: 292–299. doi:10.18520/cs/v115/i2/292-299
31. Demirel B, Yenigün O. Two-phase anaerobic digestion processes: A review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2002. pp. 743–755. doi:10.1002/jctb.630
32. Owen WF, Stuckey DC, Healy JB, Young LY, McCarty PL. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Res*. 1979;13: 485–492. doi:10.1016/0043-1354(79)90043-5
33. Labatut RA, Angenent LT, Scott NR. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresour Technol*. 2011;102: 2255–2264. doi:10.1016/j.biortech.2010.10.035

34. Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, Borzacconi L, Campos JL, Guwy AJ, et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*. 2009;59: 927–934. doi:10.2166/wst.2009.040
35. Raposo F, Fernández-Cegri V, De la Rubia MA, Borja R, Béline F, Cavinato C, et al. Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2011;86: 1088–1098. doi:10.1002/jctb.2622
36. Lozada P, Pérez A. ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA: UNA HERRAMIENTA DE CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES. *Eidenar*. 2010;9: 5–14.
37. Vélez R, Lozano N. Evaluación del impacto ambiental de la gestión de residuos sólidos orgánicos mediante la técnica de análisis de ciclo de vida. *Revista Internacional de Ciencias Ambientales*. 2018;2: 57–67.
38. Guamán M, Duque C. Evaluación del impacto ambiental de la gestión de residuos sólidos orgánicos mediante el análisis de ciclo de vida. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2018;34: 325–338.
39. Finkbeiner M, Jolliet O, Lehmann A, Schenck R. Life cycle assessment as a tool to support sustainable decision making. *J Ind Ecol*. 2021;25.
40. Alfonso M, Amengual N, Vieytes L, Enrique L. “CUANTIFICACIÓN DELANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES,DISTRITO DE BELLAVISTA, 2021.” Callao; 2022. Available: <https://meet.google.com/wbt-okpc-qmv>,
41. Jiménez Páez E, Alonso B, Ángeles F, Reyes T. Análisis de ciclo de vida comparativo entre la deposición en vertedero y el tratamiento biológico mediante digestión anaerobia de residuos de frutas y verduras generados en mercados abiertos. Universidad de Sevilla. 2021. Available: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/128852/TFM-2152-JIMENEZ%20PAEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
42. Zhang B, Su S, Zhu Y, Li X. An LCA-based environmental impact assessment model for regulatory planning. *Environ Impact Assess Rev*. 2020;83: 106406. doi:10.1016/j.eiar.2020.106406
43. ISO. ISO 14040:2006(es). In: *Gestión Ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia* . 16 Aug 2023.
44. ISO. ISO 14040 International Standards. In: *Environmental management-Life Cycle Assessment: Prin-ciples and framework*. Switzerland. 2006.
45. Garolena P, Cardenas J. El análisis de ciclo de vida de la cuna a la tumba. *EEAOC*. 2018. Available: <https://www.eeaoc.org.ar/wp-content/uploads/2018/11/34-4-7.pdf>
46. SimaPro. SimaPro: Base de datos. In: <https://www.simapro.mx/datos.html>. 2024.
47. Muñoz M, Santos R, Contreras A, Dominguez R, Cardenas T. ANÁLISIS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE MANTA, ECUADOR. *SAPIENTIAE*. 2020;3: 6.
48. Villavicencio J, Arévalo M. Análisis de Ciclo de Vida del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos de la ciudad de Puyo. *Universidad Estatal Amazónica*. 2016.
49. Segura Y, Sandoval F, Contreras E, Cerda A. Análisis de la calidad del aire y su relación con la percepción del olor en un vertedero de residuos sólidos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2018;34: 261–273.

50. Román P, Martínez M, Pantoja A. Manual de Compostaje del agricultor. Santiago de Chile; 2013.
51. Castells X. Tratamiento y valorización energética de residuos. Díaz de Santos, S.A. Albasanz 2, editor. Madrid: Fundación Universitaria Iberoamericana; 2012.
52. Contreras A. Ensayo de estabilización y reparación de digestores anaerobios, con residuos industriales y agroalimentarios, en un proceso de co-digestión anaerobia. DEPARTAMENTO DE CRISTALOGRAFÍA, MINERALOGÍA Y QUÍMICA AGRÍCOLA. 2017.
53. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. APHA, AWWA, WEF, editors. Washington DC.; 2005.
54. Pradhan S, Abdelaal AH, Mroue K, Al-Ansari T, Mackey HR, McKay G. Biochar from vegetable wastes: agro-environmental characterization. *Biochar*. 2020;2: 439–453. doi:10.1007/s42773-020-00069-9
55. Filer J, Ding HH, Chang S. Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research. *Water (Basel)*. 2019;11: 921. doi:10.3390/w11050921
56. Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, Borzacconi L, Campos JL, Guwy AJ, et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*. 2009;59: 927–934. doi:10.2166/wst.2009.040
57. Holliger C, Alves M, Andrade D, Angelidaki I, Astals S, Baier U, et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*. 2016;74: 2515–2522. doi:10.2166/wst.2016.336
58. Cardenas L, Parra B, Torres P, Vásquez Carlos. Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *ION*. 2016;29.
59. Yoo M, Han S-J, Wee J-H. Carbon dioxide capture capacity of sodium hydroxide aqueous solution. *J Environ Manage*. 2013;114: 512–519. doi:10.1016/j.jenvman.2012.10.061
60. Bres P, Beily M, Crespo D. Ensayo potencial bioquímico metanogénico. *INTA*. 2022;2: 25–63.
61. Fei X, Jia W, Chen T, Ling Y. Life-cycle assessment of two food waste disposal processes based on anaerobic digestion in China. *J Clean Prod*. 2021;293: 126113. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126113
62. Ortegon M. Evaluación del potencial acidogénico para la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) a partir de lixiviados de los residuos sólidos orgánicos . CRAI USTA. 2016.
63. Benetto E, Nguyen D, Lohmann T, Schmitt B, Schosseler P. Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment. *Science of The Total Environment*. 2009;407: 1506–1516. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.11.016
64. Dimambro ME, Lillywhite RD, Rahn CR. The Physical, Chemical and Microbial Characteristics of Biodegradable Municipal Waste Derived Composts. *Compost Sci Util*. 2007;15: 243–252. doi:10.1080/1065657X.2007.10702340
65. Gómez M. Determinación del potencial bioquímico de metano y del potencial de suministro eléctrico neto de la fracción orgánica de los residuos sólido urbanos de mercados de abasto del distrito de Arequipa . Universidad Católica San Pablo. 2017.
66. Opatokun SA, Yousef LF, Strezov V. Agronomic assessment of pyrolysed food waste digestate for sandy soil management. *J Environ Manage*. 2017;187: 24–30. doi:10.1016/j.jenvman.2016.11.030
67. Slorach PC, Jeswani HK, Cuéllar-Franca R, Azapagic A. Environmental and economic implications of recovering resources from food waste in a circular economy. *Science of The Total Environment*. 2019;693: 133516. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.322

68. Bernstad A, la Cour Jansen J. A life cycle approach to the management of household food waste – A Swedish full-scale case study. *Waste Management*. 2011;31: 1879–1896. doi:10.1016/j.wasman.2011.02.026
69. Alfonso M, Amengual N, Vieytes L, Enrique L. CUANTIFICACIÓN DELANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES,DISTRITO DE BELLAVISTA, 2021
70. Pace SA, Yazdani R, Kendall A, Simmons CW, VanderGheynst JS. Impact of organic waste composition on life cycle energy production, global warming and Water use for treatment by anaerobic digestion followed by composting. *Resour Conserv Recycl*. 2018;137: 126–135. doi:10.1016/j.resconrec.2018.05.030
71. Muñoz-Menéndez MB, Contreras-Moya AM, Santos-Herrero RF, Regla-Domínguez ER, Cárdenas-Ferrer TM. Resultados del procedimiento de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos urbanos en Ecuador. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*. 2020;3: 33–48. doi:10.46296/ig.v3i6.0017
72. Manu MK, Li D, Liwen L, Jun Z, Varjani S, Wong JWC. A review on nitrogen dynamics and mitigation strategies of food waste digestate composting. *Bioresour Technol*. 2021;334: 125032. doi:10.1016/j.biortech.2021.125032
73. Lombardi L, Carnevale EA, Corti A. Comparison of different biological treatment scenarios for the organic fraction of municipal solid waste. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015;12: 1–14. doi:10.1007/s13762-013-0421-y
74. Manu MK, Wang C, Li D, Varjani S, Wong JWC. Impact of zeolite amendment on composting of food waste digestate. *J Clean Prod*. 2022;371: 133408. doi:10.1016/j.jclepro.2022.133408
75. Erses Yay AS. Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. *J Clean Prod*. 2015;94: 284–293. doi:10.1016/j.jclepro.2015.01.089
76. Behrooznia L, Sharifi M, Hosseinzadeh-Bandbafha H. Comparative life cycle environmental impacts of two scenarios for managing an organic fraction of municipal solid waste in Rasht-Iran. *J Clean Prod*. 2020;268: 122217. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122217
77. LARSEN B. Hygiene and health in developing countries: defining priorities through cost?-?benefit assessments. *Int J Environ Health Res*. 2003;13: S37–S46. doi:10.1080/0960312031000122172
78. Rojas N, Galvis B. Relación entre PM2.5 y PM10 de la ciudad de Bogotá. *Revista de Ingeniería*. 2005; 54–60.
79. Weligama Thuppahige RT, Gheewala SH, Babel S. Environmental impact of organic fraction of municipal solid waste treatment by composting in Sri Lanka. *J Mater Cycles Waste Manag*. 2022;24: 189–199. doi:10.1007/s10163-021-01305-5
80. Reyes Aguilera EA. Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí*. 2018; 60–81. doi:10.5377/farem.v0i24.5552
81. Ascher S, Li W, You S. Life cycle assessment and net present worth analysis of a community-based food waste treatment system. *Bioresour Technol*. 2020;305: 123076. doi:10.1016/j.biortech.2020.123076
82. Ahamed A, Yin K, Ng BJH, Ren F, Chang VW-C, Wang J-Y. Life cycle assessment of the present and proposed food waste management technologies from environmental and economic impact perspectives. *J Clean Prod*. 2016;131: 607–614. doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.127

83. Tian H, Wang X, Lim EY, Lee JTE, Ee AWL, Zhang J, et al. Life cycle assessment of food waste to energy and resources: Centralized and decentralized anaerobic digestion with different downstream biogas utilization. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021;150: 111489. doi:10.1016/j.rser.2021.111489
84. Ramírez-Islas ME, Güereca LP, Sosa-Rodríguez FS, Cobos-Peralta MA. Environmental assessment of energy production from anaerobic digestion of pig manure at medium-scale using life cycle assessment. Waste Management. 2020;102: 85–96. doi:10.1016/j.wasman.2019.10.012

ANEXOS

Anexo 1: Encuesta a los encargados de los PDC de alrededor de la URAI.

1. 1. Puestos de comida

Marca solo un óvalo.

- ☐ Cafetería
- ☐ Puesto 1
- ☐ Puesto 2
- ☐ Puesto 3
- ☐ Puesto 4

3. 2. Productos en venta

Selecciona todas las opciones que correspondan.

- ☐ Frutas
- ☐ Dulces (caramelos, galletas, chupetes, etc)
- ☐ Mariscos
- ☐ Ensalada
- ☐ Arroz
- ☐ Pollo
- ☐ Carnes
- ☐ Jugos
- ☐ Té
- ☐ Otros: _____

2. Fecha

Ejemplo: 7 de enero de 2019

Actividad comercial del negocio

4. 3. ¿Desde qué mes/año funciona su local dentro de las instalaciones de IKIAM?

5. 4. ¿Qué días abre su negocio?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

- ☐ Lunes
- ☐ Martes
- ☐ Miércoles
- ☐ Jueves
- ☐ Viernes
- ☐ Sábado
- ☐ Domingo
- ☐ Otros: _____

Gestión de residuos en la universidad

6. 5. ¿Qué tipo de residuos genera?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

- ☐ Restos de comida
- ☐ Cáscaras de frutas
- ☐ Verduras y hortalizas
- ☐ Cascarón de huevo
- ☐ Restos de café
- ☐ Bolsas de té
- ☐ Pan
- ☐ Bagazo de frutas
- ☐ Servilletas
- ☐ Huesos

- ☐ Productos cárnicos
- ☐ Fundas plásticas
- ☐ Cartón
- ☐ Cueros
- ☐ Vasos plásticos
- ☐ Platos desechables
- ☐ Otros: _____

7. 6. ¿Dónde deposita los residuos que usted produce?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

- ☐ Funda
- ☐ Costal
- ☐ Contenedor después de usar fundas/costales u otros
- ☐ Contenedor sin usar fundas/costales u otros
- ☐ Balde
- ☐ Otros: _____

8. 7. ¿Qué cantidad (libras) de residuos orgánicos genera diariamente?

Marca solo un óvalo.

☐ $> 0 \leq 5$

☐ $> 5 \leq 10$

☐ $> 15 \leq 20$

☐ $> 20 \leq 25$

☐ $> 25 \leq 30$

☐ $> 30 \leq 45$

☐ $> 45 \leq 50$

☐ $> 50 \leq 55$

☐ > 60

☐ Otros: _____

9. 8. En base a la respuesta anterior: ¿Qué porcentaje de los residuos que genera corresponde a residuos orgánicos?

Marca solo un óvalo.

☐ 0 - 10

☐ 10 - 20

☐ 20 - 30

☐ 40 - 50

☐ 50 - 60

☐ 60 - 70

☐ Otros: _____

10. 9. ¿Con qué frecuencia clasifica o separa los residuos sólidos de su negocio en orgánicos e inorgánicos?

Marca solo un óvalo.

☐ Siempre

☐ Casi siempre

☐ A veces

☐ Casi nunca

☐ Nunca

11. 10. ¿Con qué frecuencia ha escuchado que los residuos producidos en la universidad son aprovechados (reciclados/reutilizados/compostados)?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Siempre
☐ Casi siempre
☐ A veces
☐ Casi nunca
☐ Nunca

12. 11. ¿Qué tipo de sistema usa para desechar los residuos?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

- ☐ Alimento para animales (cerdos, pollos, etc), ej: lavaza
☐ Compostaje
☐ Reciclaje (para la fracción inorgánica)
☐ Servicio municipal de recolección de residuos
☐ Otros: _____

13. 12. ¿Con qué frecuencia (las personas cercanas a la universidad) retiran los restos de comida para alimento de animales en su negocio?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Diariamente
☐ Semanalmente
☐ Mensualmente
☐ Nunca
☐ Otros: _____

14. 13. ¿Considera importante el manejo adecuado de los residuos en su negocio?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Siempre
☐ Casi siempre
☐ A veces
☐ Casi nunca
☐ Nunca
☐ Otros: _____

15. 14. ¿Está conforme con el número de contenedores y basureros que existe en la universidad?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Muy conforme
☐ Conforme
☐ Neutral
☐ Poco conforme
☐ No conforme
☐ Otros: _____

16. 15. ¿Cuán importante considera usted que es que los contenedores cuenten con un tipo específico de residuos (orgánico/inorgánico)?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Muy importante
☐ Importante
☐ Neutral
☐ Poco importante
☐ No es importante
☐ Otros: _____

17. 16. ¿Cómo evalúa el sistema que usa la universidad para desechar los residuos?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Muy Satisfactorio
☐ Moderadamente satisfactorio
☐ Regular
☐ Poco satisfactorio
☐ Nada satisfactorio

Alternativas para la gestión de residuos orgánicos - énfasis en Restos de comida

18. 17. ¿Considera viable alguna de las siguientes alternativas para gestionar los residuos?

Selecciona todas las opciones que correspondan.

- ☐ Relleno sanitario
☐ Composteras
☐ Digestión anaerobia
☐ Alimento para animales
☐ Otros: _____

19. 18. ¿Estaría interesado/a en conocer más sobre alternativas para descartar residuos?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Interesado
☐ Parcialmente interesado
☐ Neutral
☐ Poco interesado
☐ Desinteresado

20. Nombre y Apellido

21. Número de celular

Anexo 2: Cuantificación de los RA de la URAI.

PDC1(BAR)			PDC2		
Fecha	Orgánico (Kg)	Orgánico acumulado (Kg)	Fecha	Orgánico (Kg)	Orgánico acumulado (Kg)
14/4/2023	16	16	14/4/2023	3,5	3,5
17/4/2023	12	28	17/4/2023	2,1	5,6
18/4/2023	22,7	50,7	18/4/2023	2	7,6
19/4/2023	32,2	82,9	19/4/2023	2,1	9,7
20/4/2023	9,5	92,4	20/4/2023	4	13,7
21/4/2023	25	117,4	21/4/2023	3	16,7
24/4/2023	20,8	138,2	24/4/2023	3,6	20,3
25/4/2023	32,2	170,4	25/4/2023	2,5	22,8
26/4/2023	23,1	193,5	26/4/2023	3,2	26
27/4/2023	14	207,5	27/4/2023	1,7	27,7
28/4/2023	13,5	221	28/4/2023	2,3	30
2/5/2023	16,5	237,5	2/5/2023	4,5	34,5
3/5/2023	11,8	249,3	3/5/2023	2,5	37
4/5/2023	22,7	272	4/5/2023	3	40
5/5/2023	18,5	290,5	5/5/2023	3,2	43,2
8/5/2023	15	305,5	8/5/2023	2,7	45,9
9/5/2023	21,5	327	9/5/2023	1,5	47,4
10/5/2023	12	339	10/5/2023	3,5	50,9
11/5/2023	19	358	11/5/2023	2,8	53,7
12/5/2023	14,6	372,6	12/5/2023	1,6	55,3
15/5/2023	15,9	388,5	15/5/2023	2	57,3
16/5/2023	16,8	405,3	16/5/2023	4	61,3
17/5/2023	18,14	423,44	17/5/2023	2,7	64
18/5/2023	11,3	434,74	18/5/2023	1,6	65,6
19/5/2023	75	509,74	19/5/2023	4,8	70,4
22/5/2023	0	509,74	22/5/2023	5,5	75,9
23/1/1900	0	509,74	23/5/2023	2,5	78,4
24/5/2023	42	551,74	24/5/2023	3	81,4
25/5/2023	28	579,74	25/5/2023	3,5	84,9
29/5/2023	57	636,74	29/5/2023	4,5	89,4
30/5/2023	37	673,74	30/5/2023	3,5	92,9
31/5/2023	42	715,74	31/5/2023	5,2	98,1
1/6/2023	42	757,74	1/6/2023	3,5	101,6
2/6/2023	12	769,74	2/6/2023	3	104,6
5/6/2023	18,5	788,24	5/6/2023	4,5	109,1
6/6/2023	20	808,24	6/6/2023	3	112,1
7/6/2023	15,3	823,54	7/6/2023	2,7	114,8
8/6/2023	14,5	838,04	8/6/2023	2	116,8
9/6/2023	16	854,04	9/6/2023	2,8	119,6

12/6/2023	26	880,04	12/6/2023	3	122,6
13/6/2023	21	901,04	13/6/2023	2,7	125,3
14/6/2023	20	921,04	14/6/2023	4	129,3
15/6/2023	18,5	939,54	15/6/2023	2,5	131,8
19/6/2023	15	954,54	19/6/2023	3,5	135,3
20/6/2023	18	972,54	20/6/2023	2,6	137,9
21/6/2023	60	1032,54	21/6/2023	4	141,9
22/6/2023	11	1043,54	22/6/2023	3	144,9
23/6/2023	16	1059,54	23/6/2023	3,5	148,4
26/6/2023	18	1077,54	26/6/2023	4,5	152,9
27/6/2023	19,5	1097,04	27/6/2023	2,5	155,4
28/6/2023	22	1119,04	28/6/2023	2	157,4
29/6/2023	32	1151,04	29/6/2023	3,5	160,9
30/6/2023	0	1151,04	30/6/2023	2	162,9
3/7/2023	25	1176,04	3/7/2023	4	166,9
4/7/2023	30	1206,04	4/7/2023	3,6	170,5
5/7/2023	25	1231,04	5/7/2023	1,5	172
6/7/2023	15	1246,04	6/7/2023	2,5	174,5
7/7/2023	15	1261,04	7/7/2023	3	177,5
10/7/2023	21,6	1282,64	10/7/2023	4	181,5
11/7/2023	19	1301,64	11/7/2023	2,6	184,1
12/7/2023	12	1313,64	12/7/2023	2,5	186,6
13/7/2023	0	1313,64	13/7/2023	2,3	188,9
14/7/2023	12	1325,64	14/7/2023	4	192,9
17/7/2023	20	1345,64	17/7/2023	3,7	196,6
18/7/2023	13	1358,64	18/7/2023	4	200,6
19/7/2023	17	1375,64	19/7/2023	4,3	204,9
20/7/2023	15	1390,64	20/7/2023	3,9	208,8
21/7/2023	23	1413,64	21/7/2023	2,5	211,3
24/7/2023	16	1429,64	24/7/2023	3,9	215,2
25/7/2023	13	1442,64	25/7/2023	2	217,2
26/7/2023	16	1458,64	26/7/2023	3,8	221
27/7/2023	13	1471,64	27/7/2023	2,1	223,1
28/7/2023	15	1486,64	28/7/2023	4	227,1
31/7/2023	19	1505,64	31/7/2023	2,8	229,9
1/8/2023	21	1526,64	1/8/2023	4	233,9
2/8/2023	32	1558,64	2/8/2023	2	235,9
3/8/2023	13	1571,64	3/8/2023	2,1	238
4/8/2023	34	1605,64	4/8/2023	3,5	241,5
7/8/2023	25	1630,64	7/8/2023	3	244,5
8/8/2023	19	1649,64	8/8/2023	3	247,5
9/8/2023	17	1666,64	9/8/2023	3	250,5
10/8/2023	34	1700,64	10/8/2023	4,3	254,8
11/8/2023	35	1735,64	11/8/2023	2,8	257,6
2/10/2023	26	1761,64	2/10/2023	3,6	261,2

3/10/2023	34	1795,64	3/10/2023	2,3	263,5
4/10/2023	21	1816,64	4/10/2023	4	267,5
5/10/2023	32	1848,64	5/10/2023	4,5	272
6/10/2023	34	1882,64	6/10/2023	2,6	274,6
10/10/2023	30	1912,64	10/10/2023	2,5	277,1
11/10/2023	33	1945,64	11/10/2023	4,3	281,4
12/10/2023	18	1963,64	12/10/2023	3,2	284,6
13/10/2023	26	1989,64	13/10/2023	2,5	287,1
16/10/2023	27	2016,64	16/10/2023	3	290,1
17/10/2023	13	2029,64	17/10/2023	4,5	294,6
18/10/2023	35	2064,64	18/10/2023	2,3	296,9
23/10/2023	20	2084,64	23/10/2023	2,3	299,2
24/10/2023	35	2119,64	24/10/2023	4	303,2
25/10/2023	33	2152,64	25/10/2023	2,8	306
26/10/2023	35	2187,64	26/10/2023	4	310
27/10/2023	35	2222,64	27/10/2023	3,7	313,7
30/10/2023	15	2237,64	30/10/2023	2,2	315,9
31/10/2023	13	2250,64	31/10/2023	3,3	319,2
1/11/2023	27	2277,64	1/11/2023	3	322,2
6/11/2023	16	2293,64	6/11/2023	2,8	325
7/11/2023	31	2324,64	7/11/2023	2,4	327,4
8/11/2023	24	2348,64	8/11/2023	5	332,4
9/11/2023	32	2380,64	9/11/2023	4,3	336,7
10/11/2023	30	2410,64	10/11/2023	4	340,7
14/11/2023	33	2443,64	14/11/2023	3,3	344
15/11/2023	22	2465,64	15/11/2023	3	347
16/11/2023	21	2486,64	16/11/2023	2	349
17/11/2023	17	2503,64	17/11/2023	3,8	352,8
20/11/2023	32	2535,64	20/11/2023	3,3	356,1
21/11/2023	31	2566,64	21/11/2023	3,1	359,2
22/11/2023	25	2591,64	22/11/2023	3	362,2
23/11/2023	35	2626,64	23/11/2023	3,5	365,7
24/11/2023	20	2646,64	24/11/2023	3,1	368,8
27/11/2023	21	2667,64	27/11/2023	3,1	371,9
28/11/2023	26	2693,64	28/11/2023	2	373,9
29/11/2023	31	2724,64	29/11/2023	2	375,9
30/11/2023	25	2749,64	30/11/2023	4,5	380,4
1/12/2023	19	2768,64	1/12/2023	3,1	383,5
4/12/2023	13	2781,64	4/12/2023	4	387,5
5/12/2023	18	2799,64	5/12/2023	3,5	391
6/12/2023	14	2813,64	6/12/2023	4	395
7/12/2023	22	2835,64	7/12/2023	2,5	397,5
8/12/2023	17	2852,64	8/12/2023	3	400,5
11/12/2023	33	2885,64	11/12/2023	4	404,5
12/12/2023	28	2913,64	12/12/2023	4,1	408,6

13/12/2023	30	2943,64	13/12/2023	4,1	412,7
14/12/2023	19	2962,64	14/12/2023	2,3	415
15/12/2023	10	2972,64	15/12/2023	4	419
18/12/2023	20	2992,64	18/12/2023	3	422
19/12/2023	23	3015,64	19/12/2023	2,5	424,5
TOTAL	3015,64		TOTAL	424,5	

PDC3			PDC4		
Fecha	Orgánico (Kg)	Orgánico acumulado (Kg)	Fecha	Orgánico (Kg)	Orgánico acumulado (Kg)
14/4/2023	21	21	14/4/2023	15,5	15,5
17/4/2023	19,5	40,5	17/4/2023	7,5	23
18/4/2023	10,5	51	18/4/2023	8,2	31,2
19/4/2023	16,6	67,6	19/4/2023	7	38,2
20/4/2023	11,8	79,4	20/4/2023	8	46,2
21/4/2023	9,5	88,9	21/4/2023	5	51,2
24/4/2023	13,5	102,4	24/4/2023	3,7	54,9
25/4/2023	16,5	118,9	25/4/2023	6	60,9
26/4/2023	16	134,9	26/4/2023	6,5	67,4
27/4/2023	13	147,9	27/4/2023	8,2	75,6
28/4/2023	10	157,9	28/4/2023	4,5	80,1
2/5/2023	12,6	170,5	2/5/2023	8	88,1
3/5/2023	18	188,5	3/5/2023	7	95,1
4/5/2023	19,5	208	4/5/2023	5	100,1
5/5/2023	11,5	219,5	5/5/2023	3,7	103,8
8/5/2023	13,5	233	8/5/2023	6	109,8
9/5/2023	12,7	245,7	9/5/2023	6,5	116,3
10/5/2023	20	265,7	10/5/2023	8,2	124,5
11/5/2023	8,6	274,3	11/5/2023	6,5	131
12/5/2023	9,5	283,8	12/5/2023	5	136
15/5/2023	6,5	290,3	15/5/2023	6	142
16/5/2023	13	303,3	16/5/2023	5,5	147,5
17/5/2023	11,5	314,8	17/5/2023	7,5	155
18/5/2023	10,5	325,3	18/5/2023	8,5	163,5
19/5/2023	10	335,3	19/5/2023	12	175,5
22/5/2023	9	344,3	22/5/2023	8	183,5
23/5/2023	15,6	359,9	23/5/2023	9,5	193
24/5/2023	18,5	378,4	24/5/2023	8	201
25/5/2023	21	399,4	25/5/2023	11	212
29/5/2023	15	414,4	29/5/2023	15,5	227,5
30/5/2023	16	430,4	30/5/2023	6	233,5
31/5/2023	16,2	446,6	31/5/2023	7,5	241
1/6/2023	10,8	457,4	1/6/2023	7	248

2/6/2023	13	470,4	2/6/2023	8	256
5/6/2023	12	482,4	5/6/2023	5	261
6/6/2023	15,5	497,9	6/6/2023	3,7	264,7
7/6/2023	11	508,9	7/6/2023	6	270,7
8/6/2023	14,5	523,4	8/6/2023	6,5	277,2
9/6/2023	14,5	537,9	9/6/2023	8,2	285,4
12/6/2023	14	551,9	12/6/2023	4,5	289,9
13/6/2023	13,5	565,4	13/6/2023	4,7	294,6
14/6/2023	12,5	577,9	14/6/2023	8	302,6
15/6/2023	11,3	589,2	15/6/2023	7	309,6
19/6/2023	14,5	603,7	19/6/2023	4	313,6
20/6/2023	8,5	612,2	20/6/2023	6,5	320,1
21/6/2023	14	626,2	21/6/2023	6,5	326,6
22/6/2023	11	637,2	22/6/2023	8	334,6
23/6/2023	12	649,2	23/6/2023	7	341,6
26/6/2023	13,5	662,7	26/6/2023	6,5	348,1
27/6/2023	12,5	675,2	27/6/2023	6	354,1
28/6/2023	9	684,2	28/6/2023	5,5	359,6
29/6/2023	14	698,2	29/6/2023	7	366,6
30/6/2023	11,5	709,7	30/6/2023	6,5	373,1
3/7/2023	10,5	720,2	3/7/2023	5	378,1
4/7/2023	10,5	730,7	4/7/2023	6	384,1
5/7/2023	12,5	743,2	5/7/2023	5,5	389,6
6/7/2023	8	751,2	6/7/2023	7,5	397,1
7/7/2023	13	764,2	7/7/2023	8,5	405,6
10/7/2023	9	773,2	10/7/2023	6	411,6
11/7/2023	9,5	782,7	11/7/2023	8	419,6
12/7/2023	7,8	790,5	12/7/2023	7	426,6
13/7/2023	6,7	797,2	13/7/2023	5,6	432,2
14/7/2023	11,5	808,7	14/7/2023	7,5	439,7
17/7/2023	20	828,7	17/7/2023	8	447,7
18/7/2023	10	838,7	18/7/2023	6	453,7
19/7/2023	21	859,7	19/7/2023	5	458,7
20/7/2023	9	868,7	20/7/2023	5	463,7
21/7/2023	17	885,7	21/7/2023	4	467,7
24/7/2023	13	898,7	24/7/2023	8,3	476
25/7/2023	23	921,7	25/7/2023	8	484
26/7/2023	11	932,7	26/7/2023	8	492
27/7/2023	22	954,7	27/7/2023	9	501
28/7/2023	8	962,7	28/7/2023	4,5	505,5
31/7/2023	12	974,7	31/7/2023	8	513,5
1/8/2023	10	984,7	1/8/2023	4	517,5
2/8/2023	18	1002,7	2/8/2023	8	525,5
3/8/2023	23	1025,7	3/8/2023	6	531,5
4/8/2023	8	1033,7	4/8/2023	6	537,5

7/8/2023	18	1051,7	7/8/2023	6	543,5
8/8/2023	18	1069,7	8/8/2023	9	552,5
9/8/2023	19	1088,7	9/8/2023	5,5	558
10/8/2023	23	1111,7	10/8/2023	7	565
11/8/2023	21	1132,7	11/8/2023	5	570
2/10/2023	16	1148,7	2/10/2023	7	577
3/10/2023	12	1160,7	3/10/2023	8,5	585,5
4/10/2023	10	1170,7	4/10/2023	5	590,5
5/10/2023	21	1191,7	5/10/2023	9	599,5
6/10/2023	20	1211,7	6/10/2023	4,5	604
10/10/2023	21	1232,7	10/10/2023	6	610
11/10/2023	21	1253,7	11/10/2023	9	619
12/10/2023	15	1268,7	12/10/2023	5,5	624,5
13/10/2023	10	1278,7	13/10/2023	9	633,5
16/10/2023	10	1288,7	16/10/2023	8	641,5
17/10/2023	20	1308,7	17/10/2023	7,2	648,7
18/10/2023	15	1323,7	18/10/2023	6	654,7
23/10/2023	19	1342,7	23/10/2023	4,3	659
24/10/2023	11	1353,7	24/10/2023	9	668
25/10/2023	22	1375,7	25/10/2023	7	675
26/10/2023	21	1396,7	26/10/2023	5,3	680,3
27/10/2023	9	1405,7	27/10/2023	5	685,3
30/10/2023	21	1426,7	30/10/2023	9,1	694,4
31/10/2023	21	1447,7	31/10/2023	5	699,4
1/11/2023	12	1459,7	1/11/2023	9,4	708,8
6/11/2023	16	1475,7	6/11/2023	4	712,8
7/11/2023	14	1489,7	7/11/2023	5	717,8
8/11/2023	8	1497,7	8/11/2023	7,6	725,4
9/11/2023	9	1506,7	9/11/2023	7	732,4
10/11/2023	10	1516,7	10/11/2023	11	743,4
14/11/2023	44	1560,7	14/11/2023	6,7	750,1
15/11/2023	11	1571,7	15/11/2023	5	755,1
16/11/2023	20	1591,7	16/11/2023	6	761,1
17/11/2023	13	1604,7	17/11/2023	6,8	767,9
20/11/2023	48	1652,7	20/11/2023	4	771,9
21/11/2023	32	1684,7	21/11/2023	2,5	774,4
22/11/2023	8	1692,7	22/11/2023	5	779,4
23/11/2023	9	1701,7	23/11/2023	6	785,4
24/11/2023	14	1715,7	24/11/2023	7,5	792,9
27/11/2023	30	1745,7	27/11/2023	5,7	798,6
28/11/2023	25	1770,7	28/11/2023	6	804,6
29/11/2023	12	1782,7	29/11/2023	4,7	809,3
30/11/2023	8	1790,7	30/11/2023	5,8	815,1
1/12/2023	10	1800,7	1/12/2023	6	821,1
4/12/2023	10	1810,7	4/12/2023	4	825,1

5/12/2023	12	1822,7	5/12/2023	5,7	830,8
6/12/2023	9	1831,7	6/12/2023	7	837,8
7/12/2023	8	1839,7	7/12/2023	6,4	844,2
8/12/2023	18,7	1858,4	8/12/2023	5,6	849,8
11/12/2023	19	1877,4	11/12/2023	9	858,8
12/12/2023	11	1888,4	12/12/2023	5,6	864,4
13/12/2023	12	1900,4	13/12/2023	4,5	868,9
14/12/2023	20	1920,4	14/12/2023	6	874,9
15/12/2023	8	1928,4	15/12/2023	8	882,9
18/12/2023	18	1946,4	18/12/2023	6	888,9
19/12/2023	9	1955,4	19/12/2023	6,3	895,2
TOTAL	1955,4		TOTAL	895,2	

PDC5

Fecha	Orgánico (Kg)	Orgánico acumulado (Kg)
14/4/2023	3,5	3,5
17/4/2023	4	7,5
18/4/2023	6	13,5
19/4/2023	6,5	20
20/4/2023	4,5	24,5
21/4/2023	6,3	30,8
24/4/2023	5	35,8
25/4/2023	4,8	40,6
26/4/2023	7	47,6
27/4/2023	6,5	54,1
28/4/2023	6	60,1
2/5/2023	4,5	64,6
3/5/2023	7	71,6
4/5/2023	3,6	75,2
5/5/2023	3	78,2
8/5/2023	4	82,2
9/5/2023	2,8	85
10/5/2023	3,7	88,7
11/5/2023	4,6	93,3
12/5/2023	6	99,3
15/5/2023	5	104,3
16/5/2023	3,5	107,8
17/5/2023	6	113,8
18/5/2023	8	121,8
19/5/2023	11	132,8
22/5/2023	3,5	136,3
23/5/2023	4,5	140,8

24/5/2023	4,5	145,3
25/5/2023	7,5	152,8
29/5/2023	3	155,8
30/5/2023	7	162,8
31/5/2023	5	167,8
1/6/2023	3	170,8
2/6/2023	6	176,8
5/6/2023	3	179,8
6/6/2023	5	184,8
7/6/2023	5	189,8
8/6/2023	6,3	196,1
9/6/2023	5	201,1
12/6/2023	3,5	204,6
13/6/2023	9,5	214,1
14/6/2023	4,3	218,4
15/6/2023	6,5	224,9
19/6/2023	4,5	229,4
20/6/2023	2,7	232,1
21/6/2023	4,6	236,7
22/6/2023	5,5	242,2
23/6/2023	3,6	245,8
26/6/2023	4	249,8
27/6/2023	5,5	255,3
28/6/2023	6,5	261,8
29/6/2023	6,5	268,3
30/6/2023	4,5	272,8
3/7/2023	8,5	281,3
4/7/2023	4,5	285,8
5/7/2023	5	290,8
6/7/2023	6,5	297,3
7/7/2023	5	302,3
10/7/2023	6	308,3
11/7/2023	5	313,3
12/7/2023	4,5	317,8
13/7/2023	3,6	321,4
14/7/2023	6	327,4
17/7/2023	4,8	332,2
18/7/2023	4	336,2
19/7/2023	6,1	342,3
20/7/2023	6	348,3
21/7/2023	4,4	352,7
24/7/2023	5,5	358,2
25/7/2023	5	363,2
26/7/2023	4,3	367,5
27/7/2023	5,7	373,2

28/7/2023	6	379,2
31/7/2023	3,7	382,9
1/8/2023	6,3	389,2
2/8/2023	4,6	393,8
3/8/2023	4,7	398,5
4/8/2023	4,7	403,2
7/8/2023	5,7	408,9
8/8/2023	4	412,9
9/8/2023	7	419,9
10/8/2023	5,7	425,6
11/8/2023	4	429,6
2/10/2023	5,3	434,9
3/10/2023	5	439,9
4/10/2023	4	443,9
5/10/2023	4	447,9
6/10/2023	3,9	451,8
10/10/2023	5,3	457,1
11/10/2023	5,7	462,8
12/10/2023	6,1	468,9
13/10/2023	4,4	473,3
16/10/2023	5	478,3
17/10/2023	7	485,3
18/10/2023	3,5	488,8
23/10/2023	5,5	494,3
24/10/2023	5	499,3
25/10/2023	5	504,3
26/10/2023	6,1	510,4
27/10/2023	6	516,4
30/10/2023	5,1	521,5
31/10/2023	4	525,5
1/11/2023	4,3	529,8
6/11/2023	6,5	536,3
7/11/2023	6,1	542,4
8/11/2023	4	546,4
9/11/2023	5,3	551,7
10/11/2023	6,3	558
14/11/2023	6	564
15/11/2023	6	570
16/11/2023	5	575
17/11/2023	5	580
20/11/2023	5,8	585,8
21/11/2023	4,3	590,1
22/11/2023	4	594,1
23/11/2023	5,5	599,6
24/11/2023	5	604,6

27/11/2023	4	608,6
28/11/2023	5,4	614
29/11/2023	6	620
30/11/2023	4	624
1/12/2023	4,5	628,5
4/12/2023	6	634,5
5/12/2023	3,8	638,3
6/12/2023	3,7	642
7/12/2023	6,5	648,5
8/12/2023	6	654,5
11/12/2023	4	658,5
12/12/2023	3,9	662,4
13/12/2023	5	667,4
14/12/2023	6	673,4
15/12/2023	5,8	679,2
18/12/2023	6	685,2
19/12/2023	6	691,2
TOTAL		691,2

Anexo 3: Masa de RA generada por semana

Periodo (marzo 2023 - agosto 2023)			Periodo (marzo 2023 - agosto 2023)		
PDC 1	Pesos (kg)	Peso acumulado (kg)	PDC 2	Pesos (kg)	Peso acumulado (kg)
Semana 1	117,4	117,4	Semana 1	16,7	16,7
Semana 2	103,6	221	Semana 2	13,3	30
Semana 3	69,5	290,5	Semana 3	13,2	43,2
Semana 4	82,1	372,6	Semana 4	12,1	55,3
Semana 5	137,14	509,74	Semana 5	15,1	70,4
Semana 6	70	579,74	Semana 6	14,5	84,9
Semana 7	190	769,74	Semana 7	19,7	104,6
Semana 8	84,3	854,04	Semana 8	15	119,6
Semana 9	85,5	939,54	Semana 9	12,2	131,8
Semana 10	120	1059,54	Semana 10	16,6	148,4
Semana 11	91,5	1151,04	Semana 11	14,5	162,9
Semana 12	110	1261,04	Semana 12	14,6	177,5
Semana 13	64,6	1325,64	Semana 13	15,4	192,9
Semana 14	88	1413,64	Semana 14	18,4	211,3
Semana 15	73	1486,64	Semana 15	15,8	227,1
Semana 16	119	1605,64	Semana 16	14,4	241,5
Semana 17	130	1735,64	Semana 17	16,1	257,6

Periodo (marzo 2023 - agosto 2023)			Periodo (marzo 2023 - agosto 2023)		
PDC 3	Pesos (kg)	Peso acumulado (kg)	PDC 4	Pesos (kg)	Peso acumulado (kg)
Semana 1	88,9	88,9	Semana 1	51,2	51,2
Semana 2	69	157,9	Semana 2	28,9	80,1
Semana 3	61,6	219,5	Semana 3	23,7	103,8
Semana 4	64,3	283,8	Semana 4	32,2	136
Semana 5	51,5	335,3	Semana 5	39,5	175,5
Semana 6	64,1	399,4	Semana 6	36,5	212
Semana 7	71	470,4	Semana 7	44	256
Semana 8	67,5	537,9	Semana 8	29,4	285,4
Semana 9	51,3	589,2	Semana 9	24,2	309,6
Semana 10	60	649,2	Semana 10	32	341,6
Semana 11	60,5	709,7	Semana 11	31,5	373,1
Semana 12	54,5	764,2	Semana 12	32,5	405,6
Semana 13	44,5	808,7	Semana 13	34,1	439,7
Semana 14	77	885,7	Semana 14	28	467,7
Semana 15	77	962,7	Semana 15	37,8	505,5
Semana 16	71	1033,7	Semana 16	32	537,5
Semana 17	99	1132,7	Semana 17	32,5	570

Periodo (marzo 2023 - agosto 2023)		
PDC 5	Pesos (kg)	Peso acumulado (kg)
Semana 1	30,8	30,8
Semana 2	29,3	60,1
Semana 3	18,1	78,2
Semana 4	21,1	99,3
Semana 5	33,5	132,8
Semana 6	20	152,8
Semana 7	24	176,8
Semana 8	24,3	201,1
Semana 9	23,8	224,9
Semana 10	20,9	245,8
Semana 11	27	272,8
Semana 12	29,5	302,3
Semana 13	25,1	327,4
Semana 14	25,3	352,7
Semana 15	26,5	379,2
Semana 16	24	403,2
Semana 17	26,4	429,6

Periodo (octubre 2023 - febrero 2024)			Periodo (octubre 2023 - febrero 2024)		
PDC 1	Pesos (kg)	Peso acumulado (kg)	PDC 2	Pesos (kg)	Peso acumulado (kg)
Semana 1	147	147	Semana 1	17	17
Semana 2	107	254	Semana 2	12,5	29,5
Semana 3	75	329	Semana 3	9,8	39,3
Semana 4	158	487	Semana 4	16,8	56,1
Semana 5	55	542	Semana 5	8,5	64,6
Semana 6	133	675	Semana 6	18,5	83,1
Semana 7	93	768	Semana 7	12,1	95,2
Semana 8	143	911	Semana 8	16	111,2
Semana 9	122	1033	Semana 9	14,7	125,9
Semana 10	84	1117	Semana 10	13	138,9
Semana 11	120	1237	Semana 11	18,5	157,4
Semana 12	43	1280	Semana 12	5,5	162,9

Periodo (octubre 2023 - febrero 2024)			Periodo (octubre 2023 - febrero 2024)		
PDC 3	Pesos (kg)	Peso acumulado (kg)	PDC 4	Pesos (kg)	Peso acumulado (kg)
Semana 1	79	79	Semana 1	34	34
Semana 2	67	146	Semana 2	29,5	63,5
Semana 3	45	191	Semana 3	21,2	84,7
Semana 4	82	273	Semana 4	30,6	115,3
Semana 5	54	327	Semana 5	23,5	138,8
Semana 6	57	384	Semana 6	34,6	173,4
Semana 7	88	472	Semana 7	24,5	197,9
Semana 8	111	583	Semana 8	25	222,9
Semana 9	85	668	Semana 9	28,2	251,1
Semana 10	57,7	725,7	Semana 10	28,7	279,8
Semana 11	70	795,7	Semana 11	33,1	312,9
Semana 12	27	822,7	Semana 12	12,3	325,2

Periodo (octubre 2023 - febrero 2024)		
PDC 5	Pesos (kg)	Peso acumulado (kg)
Semana 1	22,2	22,2
Semana 2	21,5	43,7
Semana 3	15,5	59,2
Semana 4	27,6	86,8
Semana 5	13,4	100,2
Semana 6	28,2	128,4
Semana 7	22	150,4
Semana 8	24,6	175
Semana 9	23,9	198,9
Semana 10	26	224,9
Semana 11	24,7	249,6
Semana 12	12	261,6