

Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



Departamento:

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Aplicación del enfoque de metabolismo urbano al análisis de emprendimientos alimentarios alternativos.

Autor(a): Maday Hernández Mendoza.

Tutores: Dr.C. Andrés Olivera Ranero.

Santa Clara , Diciembre, 2024

Copyright©UCLV

**Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas**



Academic Department:

DIPLOMA THESIS

Title: Application of the urban metabolism approach to the analysis of alternative food ventures.

Author: Maday Hernández Mendoza.

Thesis Director: Dr.C. Andrés Olivera Ranero.

Santa Clara , December, 2024

Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



ACTA DE CONFORMIDAD PARA ESTUDIANTES DE PREGRADO

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Por una parte: Maeday Hernández Mendoza, estudiante de la carrera de: Arquitectura y Urbanismo en la facultad de: CONSTRUCCIONES, en lo adelante **EI ESTUDIANTE**. Con número de identidad permanente: 02082272518. Y por otra parte el Dr. Arq. José Armando Chávez Hernández, Jefe del Departamento Docente de: Arquitectura y Urbanismo en la ya mencionada facultad, en lo adelante **EL JEFE DE DEPARTAMENTO**, y Andrés Olivera Ranero, profesor encargado de tutorar el Trabajo de Diploma **DEL ESTUDIANTE**, en lo adelante **EL TUTOR**.

Reconocen que:

- I. A **EL ESTUDIANTE** se le ha aprobado como tema de investigación para su Trabajo de Diploma el titulado: Aplicación del enfoque de metabolismo urbano al análisis de emprendimientos alimentarios alternativos a partir del metabolismo urbano.
- II.
- III. **EL ESTUDIANTE** no divulgará información concerniente a la investigación, tanto durante el desarrollo como tras la culminación de esta sin la debida autorización **DEL TUTOR** o **EL JEFE DE DEPARTAMENTO**.
- IV. Que el Trabajo de Diploma fruto de la labor investigativa de **EL ESTUDIANTE** y la asesoría de **EL TUTOR**, resulta de **TITULARIDAD EXCLUSIVA** de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- V. **EI ESTUDIANTE** una vez aprobada su tesis para la defensa, depositará una copia electrónica de la misma en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- VI. A partir de la defensa y aprobación del Trabajo de Diploma, la publicación total, parcial o la elaboración de cualquier obra que se derive de esta investigación por parte de **EL ESTUDIANTE**, contará con la coautoría de **EL TUTOR** y viceversa, resultando de referencia obligada esta obra en cualquier otra que se elabore. El incumplimiento de esta cláusula, puede llevar consigo el inicio de procesos de plagio. Todo lo anterior de acuerdo a la normativa de Derecho de Autor vigente en Cuba.

Y para que así conste se firma la presente en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, a los 25 días del mes de diciembre del año 2024.

EL ESTUDIANTE

JEFE DE DEPARTAMENTO

TUTOR

TUTOR

DEDICATORIA:

A mi familia, mi único apoyo en todo este proceso que ha sido difícil, sobre todo mis padres, Michael Hernández López y Nurys Mendoza Hernández que se han sacrificado mucho en todo mi trayecto hacia convertirme en una arquitecta.

AGRADECIMIENTOS:

A todas las personas que hicieron posible este sueño...

En especial el claustro de profesores que tuve en la carrera.

No pueden faltar, mis compañeras de cuarto, que vivimos experiencias inolvidables.

Mi tutor Andrés Olivera que se convirtió en la guía para completar esta meta.

Y por último mi familia, mis padres que siempre me han apoyado en todo.

Resumen:

El trabajo aborda el desafío de integrar la agricultura urbana a los criterios de sostenibilidad integral en las ciudades cubanas, alineada con los objetivos del Proyecto Sustento. Aunque se reconoce la relevancia de la producción alimentaria urbana, su contribución a la sostenibilidad desde el enfoque del metabolismo urbano, la huella ecológica y la economía circular sigue siendo limitada y asistemática. La investigación propone un esquema de análisis para emprendimientos alimentarios alternativos que considere ciclos metabólicos clave: agua, energía y residuos sólidos, buscando fortalecer la relación entre el sistema alimentario y la sostenibilidad urbana.

La investigación parte del problema científico: el crecimiento de la agricultura urbana en Cuba se centra en la expansión de suelos y la masividad, sin un enfoque integral en su impacto urbano sostenible. Se realizó una revisión teórica y conceptual sobre metabolismo urbano y economía circular, estableciendo tendencias actuales y antecedentes relevantes, diseñando una herramienta metodológica con indicadores específicos para analizar los ciclos metabólicos en sistemas alimentarios locales. Finalmente, se aplicó esta herramienta en emprendimientos seleccionados de Cienfuegos y en el Proyecto Sustento, confirmando su utilidad.

Los resultados incluyen un marco conceptual adaptado para el análisis del metabolismo urbano en sistemas alimentarios, indicadores específicos de evaluación y recomendaciones aplicables a casos concretos. Los aportes de la tesis son de carácter científico-técnico, metodológico y práctico, destacando la conexión entre sostenibilidad urbana y sistemas alimentarios alternativos.

Esta investigación contribuye a la comprensión y mejora de las dinámicas metabólicas urbanas en el contexto cubano, ofreciendo herramientas que permiten evaluar y promover emprendimientos alimentarios sostenibles. Así, refuerza la capacidad de las ciudades para avanzar hacia un desarrollo sostenible integral, con un enfoque más resiliente y adaptado a las demandas contemporáneas de sostenibilidad.

Palabras claves: Metabolismo urbano, sistemas alimentarios alternativos, sostenibilidad urbana, economía circular.

Abstract:

The work addresses the challenge of integrating urban agriculture into the criteria of integral sustainability in Cuban cities, aligned with the objectives of the Sustento Project. Although the relevance of urban food production is recognized, its contribution to sustainability from the perspective of urban metabolism, ecological footprint and circular economy remains limited and unsystematic. The research proposes an analysis scheme for alternative food ventures that considers key metabolic cycles: water, energy and solid waste, seeking to strengthen the relationship between the food system and urban sustainability.

The research is based on the scientific problem: the growth of urban agriculture in Cuba focuses on land expansion and massiveness, without a comprehensive approach to its sustainable urban impact. A theoretical and conceptual review was carried out on urban metabolism and circular economy, establishing current trends and relevant background, designing a methodological tool with specific indicators to analyze metabolic cycles in local food systems. Finally, this tool was applied in selected ventures in Cienfuegos and in the Sustento Project, confirming its usefulness.

The results include a conceptual framework adapted for the analysis of urban metabolism in food systems, specific evaluation indicators and recommendations applicable to specific cases. The contributions of the thesis are of a scientific-technical, methodological and practical nature, highlighting the connection between urban sustainability and alternative food systems.

This research contributes to the understanding and improvement of urban metabolic dynamics in the Cuban context, offering tools that allow the evaluation and promotion of sustainable food ventures. Thus, it reinforces the capacity of cities to advance towards comprehensive sustainable development, with a more resilient approach and adapted to contemporary sustainability demands.

Keywords: Urban metabolism, alternative food systems, urban sustainability, circular economy.

INDICE

.....	1
INTRODUCCION:	11
Protocolo:	12
Situación Problémica:	12
Problema Científico:	13
Hipótesis:	13
Objetivo General:	13
Objetivos Específicos:	13
Tareas Científicas:	13
Resultados:	14
Aportes:	14
Estructura del Trabajo:	14
CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL DE LA RELACIÓN DEL SISTEMA ALIMENTARIO ALTERNATIVO CON EL METABOLISMO URBANO CIRCULAR.	15
1.1. Metabolismo urbano como concepto de sostenibilidad de las ciudades.	15
1.1.1. Definiciones y conceptos sobre metabolismo urbano.	15
1.1.2. Metabolismo urbano en la ciudad sostenible.	18
1.2. Economía circular para el desarrollo sostenible urbano.	22
1.2.1. Definiciones y conceptos de economía circular.	22
1.2.2. Economía circular para las ciudades sostenibles.	24
1.3. Sistemas alimentarios urbanos y desarrollo sostenible.	27
1.3.1. Concepto e integración de los sistemas alimentarios.	27
1.3.2. Sistemas alimentarios alternativos en la ciudad sostenible.	31
1.4. Ciclos claves de metabolismo urbano circular en el sistema alimentario alternativo.	35
1.4.1. Enfoque cíclico del metabolismo urbano circular.	35
1.4.2. Ciclo del agua en los SAA.	38
1.4.3. Ciclo de la energía en los SAA.	39
1.4.4. Ciclo de los residuos sólidos urbanos en los SAA.	40
1.5. Conclusiones parciales:	41
CAPÍTULO II. ELEMENTOS DE ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS ALIMENTARIOS ALTERNATIVOS A PARTIR DE LOS CICLOS DE METABOLISMO URBANO CIRCULAR	43
2.1. El metabolismo urbano circular como vía para la sustentabilidad de los sistemas alimentarios en el contexto de la ciudad.	43

2.2. Evaluación de indicadores de metabolismo urbano.	47
2.3. Propuesta de esquema de análisis para el metabolismo circular de sistemas alimentarios alternativos urbanos.....	56
2.4. Esquema de análisis metabólico del ciclo del agua.....	57
2.5. Esquema de análisis metabólico del ciclo de la energía.....	59
2.6. Esquema de análisis metabólico del ciclo de los residuos sólidos urbanos.	61
2.7. Conclusiones parciales.	63
CAPÍTULO III. APLICACIÓN DEMOSTRATIVA DEL ESQUEMA DE ANÁLISIS DE LOS CICLOS DE METABOLISMO URBANO CIRCULAR EN CASOS DE ESTUDIO DEL SISTEMA ALIMENTARIO ALTERNATIVO EN CIENFUEGOS	
3.1. Desarrollo y resultados de la aplicación demostrativa.....	65
3.1.1. Caso 1: Centro de elaboración, Palmira.	65
Caracterización del centro de elaboración.	65
3.1.2. Caso 2: Combinado Cárnico del municipio de Palmira.	81
3.1.3. Caso 3: Emprendimiento local (panadería “Villar”).	97
3.2. Conclusiones parciales	109
CONCLUSIONES GENERALES.....	110
RECOMENDACIONES FINALES.	112
Bibliografía:.....	114

INTRODUCCION:

La creciente urbanización global presenta desafíos complejos para la sostenibilidad de las ciudades, especialmente en lo que respecta a la producción y distribución de alimentos. En un contexto en el que la mayoría de la población mundial reside en entornos urbanos, es crucial repensar cómo las ciudades pueden satisfacer sus necesidades alimentarias sin comprometer su equilibrio ecológico ni los recursos naturales de los que dependen. Este problema se intensifica en Cuba, donde, a pesar de los esfuerzos por promover la agricultura urbana como un modelo alternativo para la producción de alimentos, la conexión entre la producción alimentaria y los principios de sostenibilidad integral sigue siendo débil. La producción alimentaria en las ciudades se enfrenta a la necesidad urgente de alinearse con modelos de gestión que integren aspectos como la eficiencia en el uso de los recursos, la reducción de residuos y la gestión circular de materiales. En este sentido, los enfoques tradicionales de producción alimentaria urbana, aunque importantes para aumentar la disponibilidad de alimentos, no necesariamente responden a los retos más amplios de sostenibilidad urbana. Un modelo alternativo más prometedor es el que se basa en el concepto de metabolismo urbano, un enfoque que entiende a las ciudades como sistemas vivos en los que los flujos de recursos – agua, energía, materiales y residuos – se gestionan de forma integrada y eficiente. Este enfoque no solo tiene el potencial de hacer más sostenibles las ciudades, sino que también puede mejorar la resiliencia de los sistemas alimentarios urbanos, haciéndolos más adaptables a los desafíos del cambio climático, la escasez de recursos y la creciente demanda de alimentos.

A pesar de los avances que ha tenido la agricultura urbana en Cuba, el concepto de metabolismo urbano aplicado a los sistemas alimentarios sigue siendo una dimensión poco explorada. La idea de aplicar un enfoque de economía circular a la producción de alimentos, en la que los flujos de recursos sean cerrados y los desechos sean reutilizados o reciclados, ofrece una vía prometedora para mejorar la sostenibilidad de las ciudades. Sin embargo, la falta de herramientas metodológicas específicas para evaluar los emprendimientos alimentarios urbanos en función de estos criterios ha limitado el desarrollo de estrategias más efectivas. Así, existe una clara necesidad de crear y aplicar un esquema de análisis que permita evaluar, desde una perspectiva de metabolismo urbano, la eficiencia de los recursos utilizados en la producción y distribución de alimentos dentro de las ciudades.

Esta tesis tiene como objetivo proponer un esquema metodológico de análisis que permita evaluar los ciclos metabólicos clave – agua, energía y residuos sólidos – en los sistemas alimentarios urbanos alternativos. El estudio se enfoca en los emprendimientos alimentarios en la ciudad de

Cienfuegos, con el propósito de demostrar cómo la integración de los principios del metabolismo urbano y la economía circular puede ofrecer un enfoque más integral para la sostenibilidad de los sistemas alimentarios urbanos. A través de la aplicación de este esquema a diferentes casos de estudio, se busca identificar áreas de mejora en términos de eficiencia en el uso de los recursos y circularidad de los procesos, lo que contribuiría a reducir el impacto ambiental de la producción de alimentos y fortalecería la resiliencia de las ciudades ante los retos globales actuales. En el contexto cubano, donde las políticas agrícolas siguen priorizando la producción alimentaria, pero sin integrar de forma sistemática los principios de sostenibilidad urbana, esta investigación se plantea como una oportunidad para avanzar hacia un modelo más holístico y conectado con los objetivos de desarrollo sostenible. Al mismo tiempo, se busca proporcionar una base metodológica que pueda ser adaptada y aplicada en otras ciudades con características similares, contribuyendo al debate y desarrollo de enfoques más sostenibles para la producción de alimentos en contextos urbanos.

Protocolo:

Situación Problemática: Como parte de las insuficiencias y limitaciones para lograr el cumplimiento de las metas de desarrollo sostenible previstas en materia de alimentación, la situación de las ciudades es clave, dada la proporción en ascenso de población mundial que habita en ciudades y entornos urbanizados. La eficiencia del metabolismo urbano, así como los indicadores de economía circular y otros factores, están decidiendo las políticas de desarrollo urbano sostenible. Sin embargo, si bien se reconoce la importancia de la producción de alimentos en la ciudad no siempre se vincula con los criterios de mayor aplicación para la evaluación de la resiliencia y la sostenibilidad urbanas.

En Cuba se brinda máxima prioridad a la producción y distribución de alimentos, teniendo como eje el movimiento de Agricultura Urbana, sin embargo, es débil la vinculación integral de las actividades del Sistema Alimentario y falta aún por estudiar y proponer líneas de acción para lograr que la producción alimentaria de las ciudades aporte también a su carácter sostenible, que en la actualidad se centra en principios de metabolismo urbano, huella ecológica y economía circular.

Es pertinente y necesario que el trabajo de diploma logre aportar, dentro de las limitaciones de su tiempo y profundidad, al avance de esa integralidad necesaria para el desarrollo sostenible urbano. También es oportuno señalar que sus resultados estarán conciliados con los temas de investigación que actualmente se llevan a cabo en la UCLV dentro del Proyecto Sustento.

Problema Científico: El crecimiento de la actividad de agricultura urbana que se estimula actualmente en las ciudades cubanas se centra en el aumento de suelo cultivado, producción de alimentos y masividad popular, siendo débil y asistemático el enfoque de su aporte a la sostenibilidad integral urbana.

Hipótesis: Si se enfoca el sistema alimentario alternativo en la ciudad a partir de criterios que impliquen el metabolismo urbano y la economía circular, podrá hacerse una evaluación más integral de sus actividades y emprendimientos componentes, de cara a la sostenibilidad urbana.

Objetivo General: Proponer un esquema de análisis de emprendimientos alimentarios alternativos a partir del metabolismo urbano.

Objetivos Específicos:

1. Establecer el marco teórico de la aplicación en las ciudades del enfoque de metabolismo urbano.
2. Proponer una herramienta metodológica para analizar los ciclos metabólicos de agua energía y residuos sólidos urbanos en emprendimientos alimentarios locales.
3. Aplicar demostrativamente la herramienta propuesta en emprendimientos alimentarios seleccionados.

Tareas Científicas:

• **Etapa 1:** Conceptualización y estado del arte. Es una etapa inicial que sirve de fundamento para la investigación, donde se aplican métodos de identificación y selección de la información científico-técnica más relevante y relacionada con el problema y los objetivos del trabajo. Se emplearán técnicas de mapeo conceptual, definiendo términos y conceptos y sus relaciones teóricas y prácticas. También se elaborarán tablas de identificación de los planteamientos de las fuentes (autores) de mayor significación, para su comparación y determinación de tendencias. En cuanto al estado del arte, se identificarán los antecedentes teóricos del tema, las corrientes actuales y sus tendencias a corto y mediano plazo.

• **Etapa 2:** Análisis y síntesis de resultados. Es la etapa clave del trabajo, donde se fundamentarán los ciclos metabólicos urbanos que son objeto de estudio y la estructura de variables e indicadores que se adecuan a cada uno, a partir de los resultados de la Etapa 1. También se aplicará el método de expertos, en versión abreviada, para contrastar y adecuar los planteamientos teóricos y metodológicos propuestos y se hará una síntesis en los indicadores que se proponen para aplicarse a los emprendimientos del sistema alimentario alternativo.

- **Etapa 3:** Aplicación y confirmación. Constituye una etapa conclusiva, donde se seleccionan casos específicos de estudio en la ciudad de Cienfuegos y en el sector urbano donde se ejecuta el Proyecto Sustento por la UCLV, a los cuales se le aplicará el sistema de indicadores propuestos y se logrará una confirmación de su validez, en primera instancia, para evaluar sostenibilidad urbana de los emprendimientos, para el caso concreto de los ciclos metabólicos objeto de estudio. En esta etapa también se arriba a conclusiones y recomendaciones de la tesis.

Resultados:

- Relación de términos y conceptos sobre metabolismo urbano circular adecuados al análisis de sistemas alimentarios alternativos en la ciudad.
- Indicadores de evaluación de metabolismo urbano circular para los ciclos metabólicos seleccionados.
- Recomendaciones para la evaluación de emprendimientos del sistema alimentario alternativo a partir del metabolismo urbano circular.

Aportes:

a. Científico-técnico: En la aplicación de conceptos de sostenibilidad en los sistemas alimentarios alternativos urbanos desde el punto de vista de los ciclos de metabolismo urbano circular.

b. Metodológico: En la creación de un método de determinación de indicadores de evaluación de metabolismo urbano circular que puedan adecuarse a otros ciclos metabólicos de la ciudad.

c. Práctico: En la aplicación de los conceptos e indicadores propuestos a emprendimientos específicos que contribuyen a la investigación del Proyecto Sustento.

Estructura del Trabajo:

- **Introducción.** Fundamentación e importancia de la problemática de estudio. Planteamiento conceptual y metodológico de la tesis.
- **Capítulo I.** Marco conceptual de la relación del sistema alimentario alternativo con el metabolismo urbano circular.
- **Capítulo II.** Indicadores de metabolismo urbano circular de sistemas alimentarios alternativos para los ciclos del agua, la energía y la gestión de residuos sólidos urbanos.
- **Capítulo III.** Aplicación demostrativa de la aplicación de los indicadores de metabolismo urbano circular en emprendimientos alimentarios seleccionados.

- **Conclusiones y recomendaciones.** Conclusiones generales de la investigación. Recomendaciones finales para su continuidad y aplicación.
- **Bibliografía.** Relación de las fuentes de información científico-técnicas utilizadas.

CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL DE LA RELACIÓN DEL SISTEMA ALIMENTARIO ALTERNATIVO CON EL METABOLISMO URBANO CIRCULAR.

Inicialmente, el metabolismo urbano se inspiró en la biología, comparando las ciudades con organismos que intercambian materia y energía con su entorno. Sin embargo, la visión ha evolucionado, reconociendo que las ciudades, como los ecosistemas, son sistemas complejos y autoorganizados, influenciados por las actividades humanas. La aplicación de herramientas conceptuales y metodológicas propias del análisis metabólico ha impulsado el desarrollo de modelos innovadores para comprender mejor la dinámica de las ciudades y su impacto ambiental. Este capítulo profundiza en la teoría del metabolismo urbano, explorando sus orígenes, evolución y principales conceptos y definiciones. Se analizan las diferentes perspectivas que han nutrido su comprensión, desde su base biológica hasta su aplicación como una herramienta de análisis para la planificación y gestión urbana sostenible, enfocado en sistemas que permiten capturar la complejidad de los sistemas urbanos, identificando oportunidades para optimizar el uso de recursos.

1.1. Metabolismo urbano como concepto de sostenibilidad de las ciudades.

1.1.1. Definiciones y conceptos sobre metabolismo urbano.

Las crecientes complicaciones de los sistemas urbanos y la necesidad de administrar de forma sostenible el uso de recursos y la producción de desechos han impulsado la búsqueda de nuevos marcos conceptuales que permitan analizar las dinámicas urbanas de forma integral y holística. El metabolismo urbano, como un enfoque interdisciplinario diverso, surge como una herramienta valiosa y útil para comprender la interrelación compleja entre las ciudades y su entorno circundante, y para identificar estrategias innovadoras que posibiliten la construcción de urbes más resilientes, equitativas e inclusivas. Sin embargo, aplicar con éxito este enfoque requiere el trabajo coordinado de múltiples actores, así como una visión de largo plazo capaz de sopesar los beneficios a largo plazo frente a las soluciones a corto plazo que suelen imponerse en aras de la eficiencia administrativa inmediata.

La definición de metabolismo urbano surge en la década de los 60, propuesto por Abel Wolman, quien acuñó el concepto, referido al consumo de recursos, generación de residuos y efectos en

la ciudad ([Niño-Soto & Chávez-Martínez, 2020](#)); además, comparte la base de diferentes disciplinas de la economía ecológica. El metabolismo urbano se acerca a entender la relación de una comunidad con la naturaleza ([Echevarría, 2021](#)). El metabolismo urbano establece los requerimientos de materias primas y el impacto que su uso tiene en el ambiente, así como ayuda a vislumbrar las interacciones entre los materiales y los mecanismos sociales ([Ramírez, 2019](#)).

Este concepto ha estado presente en diferentes discusiones sobre medio ambiente urbano. Se ha definido como el conjunto de procesos químicos, mediante los cuales los seres vivos mantienen un intercambio continuo de materia y energía con su ambiente. Las sociedades (a cualquier escala) se sostienen también de la materia y energía que se extrae del ambiente interno o del externo([Pallasco, 2023](#)). También hace referencia al comportamiento metabólico de las ciudades como el de los organismos vivos, porque absorben recursos de su entorno y excretan residuos sobre él, el análisis metabólico puede aplicarse a todo nivel de organización de la vida([Pallasco, 2023](#)). En otras palabras, se puede definir como la suma total de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades, lo que resulta en crecimiento, producción de energía y eliminación de residuos ([Atehortúa Hernández, 2020](#)).

Aunque su origen esté claramente relacionado con los sistemas naturales, los mismos términos se han utilizado aplicados a los sistemas urbanos e industriales por la necesidad de explicar y estructurar las complejas relaciones que también se dan en los sistemas antrópicos([Jacob Cirera, 2020](#)). Se uso dicha definición para detallar el intercambio de materiales y energía entre la naturaleza y la sociedad desde la óptica de un análisis crítico de la industrialización. A lo anterior Engels aportó la idea de que los flujos de la materia trascienden desde lo biológico hasta las complejas transformaciones de las sociedades ([Niño-Soto & Chávez-Martínez, 2020](#)). Ya hacia las primeras décadas del siglo XX, se empezaron a desarrollar estudios por parte de algunos sociólogos urbanos, tal es el caso de la aplicación del concepto de metabolismo biológico aplicado a los sistemas urbanos por parte de los sociólogos Robert Park y Ernest Burgess de la Universidad de Chicago. Burgess emplea el término de metabolismo urbano para hacer una analogía del crecimiento urbano con los procesos anabólicos y catabólicos del metabolismo. Dichos estudios demuestran que el análisis del metabolismo urbano, permite cuantificar los flujos de materia y energía que circulan en un determinado territorio para satisfacer las necesidades humanas y el grado de sostenibilidad de la misma, en relación a otras ciudades con las mismas características ([Atehortúa Hernández, 2020](#)).

La idea del metabolismo urbano se usa para entender el intercambio material y energético entre estos sistemas, el objetivo es comprender cómo las ciudades procesan los flujos ecológicos en relación con su entorno([Pallasco, 2023](#)). Teniendo en cuenta que llevan a cabo una trazabilidad rigurosa y exhaustiva desde la incorporación de un insumo, al observar su transformación, utilización y consumo, hasta su disposición final o reincorporación al mismo proceso que lo empleó u otro distinto. En esta trazabilidad se puede establecer la intervención de distintos sectores sociales y estructuras económicas que participan, las cuales cuentan con arreglos diferenciados espacialmente dentro del seno de las urbes ([Cantú-Martínez, 2019](#)).

Partiendo de esta relación, se considera una ciudad sostenible aquella en la cual se da un desarrollo social, cultural y económico sin comprometer el acceso a recursos futuros para las próximas generaciones, teniendo en cuenta que no es admisible abordar características de sostenibilidad de una ciudad sin tener en cuenta el carácter ambiental dado que este aspecto impacta la forma en que se hace sociedad, cultura y desarrollo económico. Allí se espera mejorar las condiciones de habitabilidad de los ciudadanos donde ellos tienen participación en la toma de decisiones de la ciudad. En la dimensión económica se debe considerar los sistemas de innovación como motor de ella, ya que están constituidos por elementos y relaciones que interactúan en la producción, difusión y uso de nuevos conocimientos económicamente útiles, este componente pone atención a los elementos naturales y sus relaciones, para desestimular el cambio tecnológico tradicional y cortoplacista, que en muchos casos han echado a perder o amenazado la sostenibilidad de los ecosistemas y que al incluir estos elementos de manera explícita, se introduce una perspectiva a largo plazo (el mantenimiento de la vida de generaciones futuras), aspecto que el desarrollo sostenible exige considerar ([Herrera, 2020](#)).

Comprender el metabolismo urbano, es fundamental para avanzar hacia el concepto de ciudad sostenible. Analizar la eficiencia con la que se gestionan los recursos, como el agua, la energía y los alimentos, permite identificar los puntos débiles en el sistema urbano y desarrollar estrategias para optimizar su uso. La reducción del desperdicio, la reutilización de materiales y la minimización de la huella ambiental son claves para construir una ciudad que no solo sea eficiente en su funcionamiento, sino también resiliente a los desafíos del cambio climático y equitativa en la distribución de sus beneficios. Al conectar el análisis del metabolismo urbano con la búsqueda de la sostenibilidad, se traza un camino para construir ciudades que se adapten al futuro, sin comprometer los recursos del planeta ni el bienestar de sus habitantes.



Figura 1: Metabolismo urbano circular. Fuente: [Pallasco \(2023\)](#)

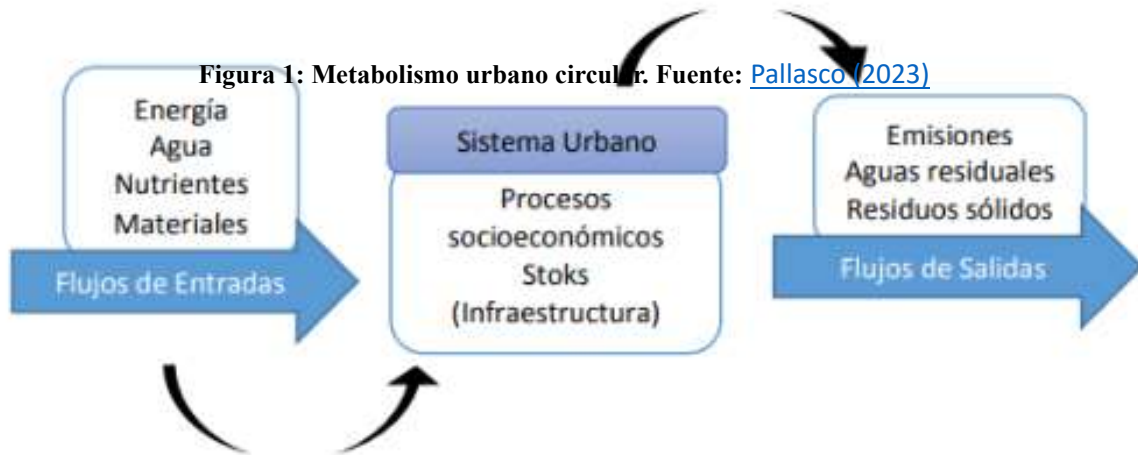


Figura 2: Análisis del flujo de materiales. Fuente: [Barro \(2018\)](#)

1.1.2. Metabolismo urbano en la ciudad sostenible.

El análisis del metabolismo urbano, no solo permite comprender cómo funcionan las ciudades, sino que también proporciona una herramienta crucial para lograr ciudades más sostenibles e identificar las áreas donde estas pueden optimizar su uso de recursos, gestionar los residuos de manera más eficiente, promover la movilidad sostenible y fortalecer la conexión con la naturaleza. La gran urbanización que se volverá una realidad en el próximo siglo traerá una mayor carga de recursos y basura a los pocos de la ciudad. Sin embargo, si no consideramos en su totalidad todas las variables implicadas ni los efectos azarosos que produce la alteración total y arbitraria

del equilibrio haremos que este sostenido desarrollo termine por causar graves problemas medioambientales, problemas cuyo origen debe rastrearse directamente en el modelo mismo pero que limitarán en forma cada vez más evidente el progreso social y económico durante los próximos decenios ([Carrato-Gómez & Roig-Segovia, 2022](#)).

Las ciudades de forma general representan sistemas de entorno temporal en los cuales una misma área se constituye con numerosos componentes subyacentes. Estos sistemas subyacentes, recursos, economía, sociedad, tecnología, gobierno, cultura y medio ambiente todos están interrelacionados. Así, las complejas relaciones resultantes influyen en la forma en que la ciudad se diseña y sobre la totalidad de su entorno donde se realiza el cálculo de metas para el equilibrio del sustento humano. Es por esta causa que la idea de metabolismo urbano apunta para un modelo de equilibrio y en algunos casos ciertos autores se negarán a pensar la sustentabilidad urbana como proceso espacialmente circunscrito, que presupone la irrelevancia de los flujos materiales que unen las ciudades a los espacios no urbanos, llegarán a negar inclusive la posibilidad de concebir "ciudades sustentables", considerando irrealista la pretensión de limitar el radio de acción de los flujos de materia y energía requeridos por el desarrollo urbano al espacio circunscrito de las ciudades ([Acsehrad, 1999](#)).

El análisis del metabolismo urbano constituye una herramienta importante para el estudio del ecosistema urbano ya que está ligado a los materiales, el agua y la energía, recursos que son el soporte vital de cualquier urbe o territorio para preservar el orden y mitigar la contaminación ([Vetrugno & Riaño, 2021](#)), conlleva además la cuantificación de insumos (entradas), productos (salidas) y la capacidad de almacenamiento de energía, agua, alimentos, materiales y desechos en el interior de una ciudad. La energía exosomática o socio-metabólica hace referencia a los flujos de materiales y energía que se requieren a escala social para garantizar la supervivencia y reproducción de un conjunto de individuos. La extracción de carbón, la perforación de pozos petroleros o la cosecha de cultivos forman parte de los procesos que la sociedad precisa para asegurar su subsistencia a largo plazo ([Atehortúa Hernández, 2020](#)). Entonces las ciudades como sistemas artificiales pueden ser rediseñadas desde una mejor perspectiva como ecosistemas naturales ([Herrera Mancero & Vilema Tigxi, 2019](#)).

Desde otra perspectiva es necesario desacoplar la intensidad en el uso de recursos naturales y los impactos ambientales, del bienestar humano y el crecimiento económico siendo una oportunidad de mejorar tanto las condiciones de vida y la estabilidad de los ecosistemas y neoecosistemas especialmente en el entorno urbano, ya que es posible aprovechar las bondades que nos aporta la innovación en ciencia y tecnología para utilizar mucho más eficientemente el

agua, el suelo y los recursos genéticos de una forma más armónica con el entorno. Asimismo, el reciclado de materiales y de metales dentro de las mismas ciudades, convirtiéndolas en las mineras “sustentables” del futuro, contribuye a disminuir las tensiones importantes producidas hoy en día por la minería a cielo abierto ([Pengue & Rodriguez, 2021](#)).

Las aplicaciones del metabolismo urbano en las ciudades son variadas y representan una plataforma integrada para apoyar su planificación como sistemas socio-ecológicos dentro del concepto y la práctica de la sostenibilidad, mejorando la calidad de vida y el bienestar de sus habitantes ([Uribe, 2023](#)), ya que en lugar de tratar cada aspecto de la ciudad de forma aislada, permite comprender cómo las diferentes áreas, desde el transporte hasta el suministro de agua o la gestión de residuos, interactúan entre sí y dependen de los mismos recursos ([Díaz Álvarez, 2014](#)). Desde la perspectiva de los diversos campos de su estudio, en relación con el consumo de recursos y la gestión de residuos, se enfatiza la idea de que los entornos urbanos funcionan como sistemas metabólicos donde los factores ambientales, sociales y económicos interactúan para dar forma a los fenómenos urbanos ([Carrato-Gómez & Roig-Segovia, 2022](#)), combinando aspectos socioeconómicos a la cuantificación histórica empleando las herramientas tradicionales como análisis de “emergy” o AFM, lo que demuestra que el metabolismo urbano tiene dos dimensiones: tangible (intercambio de materia y energía entre sistemas urbano y ambiental) e intangible (aspectos socioeconómicos) ([Vetrugno & Riaño, 2021](#)).

A partir de la definición clásica del desarrollo sostenible ([Brutland, 1987](#)), hay elementos del funcionamiento de la ciudad que tienen más responsabilidad con ella, como el consumo de energía, la gestión del agua y el tratamiento de los residuos; trilogía que se constituye en la base de cualquier sistema urbano y debe tener un funcionamiento eficiente para evitar causar la menor perturbación en el ecosistema de la ciudad. Por ejemplo, el consumo de energía, requiere que la planificación urbana instaure estrategias para asegurar la autosuficiencia, a través de principios bioclimáticos, energías renovables, entre otros medios. Los proyectos urbanos deben diseñar mecanismos para el aprovechamiento de la energía solar para suplir la energía eléctrica, siendo necesarios espacios para la tecnología de captación. La gestión del agua, orientada a la sostenibilidad, debe garantizar la salud en el entorno urbano a través de agua potable, y debe implementar la infraestructura destinada a la captación de agua lluvia o la reutilización de agua residual. Los planes de manejo y gestión del líquido vital deben incorporar instrumentos y normas que minimicen en lo posible la afectación de fuentes naturales y regulen el consumo para uso doméstico, de tal manera que no exceda los setenta litros por día. Se debe desarrollar una línea estratégica para evitar las inundaciones en épocas de lluvias intensas, lo que también ayudaría

a proteger la biodiversidad en las ciudades. El tratamiento de residuos, amerita un conjunto de estrategias y normas orientadas a incentivar la utilización de materiales reciclables o renovables, preferentemente de origen local, y fijar espacios para el depósito clasificado de residuos, separándolos en papel, vidrio, envases, orgánicos y rechazo. Por otra parte, se deben instituir políticas que motiven a la creación de huertos urbanos en espacios públicos y privados, con la adecuación de áreas para generar compostaje; y, se deben implementar modelos de movilidad alternativos y menos contaminantes para reducir la emisión de gases efecto invernadero, mitigando los efectos en el cambio climático; y, materiales alternativos, ecológicos y del entorno, para las nuevas tipologías constructivas urbanas ([Alarcón Zambrano, 2023](#)).

Analizando los flujos de recursos y desechos, el metabolismo urbano identifica problemas específicos de gestión. Los procesos metabólicos que tienen lugar en los asentamientos urbanos tienen una repercusión directa sobre los territorios de donde se extraen los materiales, la energía que requiere la ciudad para subsistir y los espacios en donde se depositan los residuos u outputs producidos en el ciclo metabólico. Además, los enormes desequilibrios que se generan entre los espacios productores de materia y energía y los territorios que procesan y excretan dichos flujos, produce una “ruptura metabólica” que con el paso del tiempo se incrementará de forma exponencial ([Atehortúa Hernández, 2020](#)). Por ejemplo, al analizar el flujo de agua, se puede detectar un uso ineficiente de agua potable o un exceso de pérdidas en la red de distribución, indicando la necesidad de implementar políticas de ahorro o mejorar las infraestructuras. Del mismo modo, el análisis de los flujos de residuos puede revelar un alto porcentaje de residuos orgánicos, sugiriendo la implementación de programas de compostaje o reciclaje.

En una dimensión más específica se identifican procesos metabólicos que amenazan la sostenibilidad de las ciudades. Estos incluyen niveles alterados de agua subterránea, agotamiento de materiales locales, acumulación de materiales tóxicos, islas de calor en verano y acumulación irregular de nutrientes. Más allá de las preocupaciones sobre las enormes magnitudes de los flujos de recursos hacia las ciudades, es fundamental comprender estos procesos de acumulación o almacenamiento en el metabolismo urbano. El crecimiento, que es inherentemente parte del metabolismo, provoca cambios en el agua almacenada en los acuíferos urbanos, en los materiales de la construcción, en el calor almacenado en la capa de dosel urbano y en los nutrientes potencialmente útiles en los vertederos de desechos urbanos.

Después del análisis del epígrafe se puede concluir que la vitalidad de las ciudades depende de las relaciones espaciales con el interior circundante y las redes de recursos globales, siendo el aumento del metabolismo una mayor pérdida de tierras de cultivo, bosques y diversidad de

especies; además de más tráfico y más contaminación. Los responsables de las políticas urbanas deberían considerar hasta qué punto sus recursos más cercanos están a punto de agotarse y, si es necesario, estrategias apropiadas para frenar la explotación.

1.2. Economía circular para el desarrollo sostenible urbano.

1.2.1. Definiciones y conceptos de economía circular.

La economía circular se considera un paradigma prometedor para un futuro sostenible, ha capturado la atención de académicos, gobiernos e industria. Sin embargo, la literatura sobre el tema presenta una amplia variedad de interpretaciones y enfoques, lo que dificulta una comprensión unificada del concepto. En este epígrafe se estudia las diferentes perspectivas que rodean la economía circular, analizando las definiciones y enfoques propuestos por diversas fuentes. El análisis de estas diferentes concepciones, desde las más generalistas hasta las más específicas, ayudará a construir un marco conceptual sólido para aplicar este paradigma en la gestión de las ciudades y avanzar hacia un desarrollo urbano sostenible.

De forma general, se precisa conocer que no existe una única definición de economía circular, como tampoco se puede determinar una fecha exacta en que surgió el término o un único autor. El concepto actual con el que se relaciona la economía naranja o economía circular tiene como precedente ocho escuelas de pensamiento, que comenzaron a desarrollarse en la segunda mitad de los años 70 y cuyos aportes confluyen hasta la actualidad ([Valenzuela-Inostroza et al., 2019](#)). La noción de dicho concepto remite a una serie de ideas, corrientes históricas y filosóficas que tienen que ver con la definición de retroalimentación y de ciclos en teoría de sistemas, resurgiendo después de la Segunda Guerra Mundial para hacer referencia a la computarización de sistemas no lineales y uso eficiente de máquinas ([Da Costa Pimenta, 2022](#)).

El concepto de Economía Circular es una de las nociones más comentadas, explicadas y referidas en múltiples campos, tanto académicos como institucionales y sociales, de los últimos tiempos, en la búsqueda de nuevas soluciones que vayan en el camino de generar un entorno social, económico y medioambiental caracterizado por la sostenibilidad ([Da Costa Pimenta, 2022](#)), aunque es un concepto económico no deja de velar por el bienestar del ser humano, ya que demuestra que busca una relación coherente entre las necesidades del ser humano, los medios de producción y el medio ambiente ([Cabrera, 2022](#)). Desde otra perspectiva la economía circular distingue entre ciclos técnicos y biológicos, consiste en un ciclo continuo de desarrollo positivo que conserva y mejora el capital natural y funciona de forma eficaz en todo tipo de escala ([Falappa](#)

[et al., 2019](#)). Su principal objetivo es generar prosperidad económica, proteger el medio ambiente y prevenir la contaminación, facilitando así el desarrollo sostenible, a la vez que propone, simultáneamente, diferentes estrategias en toda la cadena de producción y uso de los productos y servicios. En síntesis, la economía circular propone un modelo completamente distinto que conduce al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente. Ofrece, además, un marco de soluciones sistémicas para el desarrollo económico, abordando profundamente la causa de retos mundiales tales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, el incremento de residuos y de contaminación, al tiempo que revela grandes oportunidades de crecimiento. La economía circular revoluciona la forma en que se diseña, se produce y se consume, impulsada por el diseño y sustentada por el uso de energías y materiales renovables ([Valenzuela-Inostroza et al., 2019](#)).

La economía circular ha ido evolucionando constantemente a través de su aplicación en los procesos productivos y sistemas económicos por medio de empresas y sus diferentes escuelas; siempre con la finalidad de disminuir el impacto ambiental y un uso eficiente de los recursos, como se hace referencia anteriormente. Luego de algunos años la economía circular empieza a tomar cada vez más importancia con el gran avance de la tecnología y se concibe como un modelo de producción que gira alrededor de un esquema circular, donde los materiales que han sido reciclados pueden volverse a integrar al proceso productivo y se continúa con el mismo ciclo ([Garabiza et al., 2021](#)). En otras palabras, se trata de un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende ([Da Costa Pimenta, 2022](#)), pues pretende conseguir que los componentes y recursos en general mantengan su utilidad y valor en todo momento. Esto se puede lograr a través de un diseño, mantenimiento, reparación, reutilización, remanufactura, renovación y reciclaje duraderos ([Valenzuela-Inostroza et al., 2019](#)). El objetivo que se busca es implementar una nueva economía basada en el principio de cerrar el ciclo de vida de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, el agua y la energía, reduciendo tanto la entrada de los materiales como la producción de desechos vírgenes ([Falappa et al., 2019](#)).

Kirchherr, Reike y Hekkert, realizan un análisis de 114 definiciones distintas sobre economía circular, y en base a ello proponen la siguiente: "Definimos Economía Circular dentro de nuestro marco de codificación iterativamente desarrollado como un sistema económico que reemplaza el concepto de "final de vida" con la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en los procesos de producción/distribución y consumo ". Opera a nivel micro (productos,

empresas, consumidores), a nivel medio (parques ecoindustriales) y a nivel macro (ciudad, región, nación y más), con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible, creando simultáneamente calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social, en beneficio de las generaciones actuales y futuras. Está habilitado por nuevos modelos de negocio y consumidores responsables. Prieto Sandoval, Jaca y Ormazabal, tras realizar una revisión bibliográfica y un mapa de conocimiento de la economía circular, proponen la siguiente: “Un sistema económico que representa un cambio de paradigma en la forma en que la sociedad humana está interrelacionada con la naturaleza y tiene como objetivo evitar el agotamiento de los recursos, cerrar bucles energéticos y materiales“, facilitando el desarrollo sostenible a través de su implementación a nivel micro (empresas y consumidores), nivel medio (agentes económicos integrados en simbiosis) y nivel macro (ciudad, regiones y gobiernos) ([Alonso & Pozas, 2019](#)). En el 2018, De Angelis, presenta una última definición de economía circular: “como un sistema industrial que es restaurador o regenerativo por intención y diseño sustituye al concepto de fin de vida con restauración, desplazamientos hacia el uso de energías renovables “. Elimina el uso de productos químicos tóxicos, que perjudica la reutilización y apunta a la eliminación de residuos a través del diseño superior de materiales, productos, sistemas, y dentro de este, modelos de negocio ([Da Costa Pimenta, 2022](#)).

Las definiciones mencionadas, así como los conceptos expuestos sobre Economía Circular, tienen en común la importancia de su interpretación como una nueva forma de enfocar los ciclos de vida clásicos de los recursos y productos, entendiendo que el fin de vida puede dar lugar a nuevos ciclos, que contribuyen al aprovechamiento de recursos clave, como la energía, los materiales, las aguas y otros, todo lo cual es el camino hacia el desarrollo sostenible de nuestras sociedades.

1.2.2. Economía circular para las ciudades sostenibles.

La economía circular, con su enfoque en la reutilización, el reciclaje y la reducción de residuos, no solo es una estrategia para un desarrollo sostenible a nivel global, sino que también se convierte en un motor fundamental para la construcción de ciudades más sostenibles y resilientes, pero la implementación de la economía circular en el contexto urbano no es una tarea sencilla, se requiere de una visión que integre diversos actores y sectores de la ciudad, desde los gobiernos locales hasta las empresas y los ciudadanos.

El enfoque de economía circular tiene un enorme potencial, tanto para responder a la necesidad de una absoluta disuasión del uso de recursos naturales y del desarrollo socio-económico, como para fomentar procesos de innovación mejorando así la calidad de vida de las comunidades

([Tollin, 2016](#)). Pero a su vez depende de cómo es llevado a la práctica en cada país en el que se implementa. Es una estrategia loable, pero puede caer en una acción parche si no se definen objetivos y compromisos claros ([Cabrera, 2022](#)).

Varias fuentes analizan de manera general la relación de la economía circular y el desarrollo sostenible, como por ejemplo [Cantú-Martínez \(2019\)](#) en su revista constata que se refiere a la integración de las metas de una calidad de vida elevada, la salud y la prosperidad con justicia social y al mantenimiento de la capacidad de la tierra para conservar la vida en toda su diversidad, estas metas sociales, económicas y ambientales son interdependientes y se refuerzan mutuamente, por lo que el desarrollo sostenible se puede considerar como una vía para expresar las más amplias expectativas de la sociedad en su conjunto. En este marco de sostenibilidad el estudio de las ciudades puede abordarse desde distintos ángulos, las mismas pueden observarse como una entidad que ostenta un funcionamiento, un crecimiento y una regeneración, donde principalmente la sociedad produce bienes de consumo, servicios y residuos, colectivizando así la naturaleza; de esta manera se puede analizar y teorizar la ciudad desde una perspectiva orgánica ([Cantú-Martínez, 2019](#)).

Los principios de la economía circular están integrados con el concepto de metabolismo urbano, y su comprensión sistémica de los materiales, el clima, la energía y los flujos de información entre sistemas urbanos y rurales, en el que los sistemas económicos facilitan los recursos y servicios necesarios para apoyar la actividad humana de forma sostenible. El principio rector del enfoque metabólico circular para el desarrollo de la ciudad es la transformación de la forma en la que se concibe, planea, construye, administra y se usa la misma; basado en los principios de coevolución y sostenibilidad, propiciando no solo la preservación de los recursos naturales para las nuevas generaciones, sino también mejorando la calidad de vida de actuales generaciones a través del desarrollo, el crecimiento económico y la creación de empleo ([Tollin, 2016](#)).

En este contexto, la economía circular influye en el ordenamiento urbanístico al promover la densificación urbana, la creación de infraestructuras que fomenten la movilidad sostenible y la integración de áreas verdes que favorezcan la biodiversidad. El diseño urbano, a su vez, se nutre de los principios de la economía circular, incluyendo la planificación de espacios con énfasis en la reutilización de materiales, la integración de sistemas de captación de agua lluvia y la priorización de soluciones constructivas que minimicen el consumo de recursos. La gestión de la ciudad, por su parte, debe incorporar la economía circular en la planificación de políticas públicas, la creación de programas de incentivos para la adopción de prácticas circulares en empresas y

hogares, la implementación de sistemas de gestión de residuos eficientes y la promoción de la educación ambiental para crear conciencia ciudadana sobre la importancia de la circularidad.

El enfoque metabólico circular debe basarse en el conocimiento y el patrimonio intangible de la ciudad, incluyendo, por ejemplo, el uso de prácticas tradicionales de administración de tierras, para fortalecerse en adelante con la interacción y el conocimiento, y el intercambio/transferencia con otras comunidades u otros actores clave. Repensar la planeación de la urbe teórica y práctica, pasando de un objeto a un enfoque orientado al proceso, para definir formas autoadaptativas de planeación, más adaptables a un alto nivel de incertidumbre en dinámicas complejas, como el caso del cambio climático. Definir evaluaciones integrales y sistémicas apropiadas, basadas en el metabolismo urbano, capaces de sustentar tomas de decisiones informadas y evaluar impactos presentes y futuros, centrándose particularmente en generar beneficios colaterales (ambientales, sociales y económicos) en varios niveles espaciales y dentro de marcos temporales distintos ([Tollin, 2016](#)).

La transformación a la economía circular está asociada con altas expectativas con respecto a los beneficios ecológicos y económicos, como analiza [Almeida-Guzmán and Díaz-Guevara \(2020\)](#). Dichos estudios enfatizan en los beneficios en cuatro niveles: utilización de recursos, medioambiente, economía y beneficios sociales, estos se traducen en disponibilidad de recursos y reducir la dependencia de las importaciones, beneficios ecológicos al generar menos impactos ambientales, beneficios económicos, al gestar nuevas oportunidades para el crecimiento económico y la innovación, beneficios sociales, al promover un comportamiento sostenible del consumidor. Es decir, en un sistema perfecto de economía circular el valor de los productos y materiales se mantiene durante el mayor tiempo posible, los residuos se reducen al mínimo, y los recursos se conservan dentro de la economía, aun cuando un producto haya llegado al final de su vida útil, con el fin de volverlo a utilizar repetidamente y seguir creando valor ([Almeida-Guzmán & Díaz-Guevara, 2020](#)).

Dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la aplicación de una economía circular contribuirá a la consecución del objetivo 12, que persigue garantizar modalidades sostenibles de consumo y producción, que enlaza con los objetivos 8 “Trabajo Decente y Crecimiento Económico”, 9 “Industria, Innovación e Infraestructura”, o el 11 “Ciudades y Comunidades Sostenibles”, para, de manera conjunta, aumentar la competitividad y reducir la pobreza, y fomentar entre otras medidas, el uso eficiente de la energía y de los recursos ambientales, los empleos ecológicos y una mejor calidad de vida.

Partiendo del concepto de ciudad circular [Alonso and Pozas \(2019\)](#) define algunos ítems para aplicar a ciudades sostenibles como evitar el agotamiento de recursos o los bucles materiales. Por ejemplo, en el caso de la regeneración hace alusión a cubiertas destinadas a la generación de energía solar o cubiertas vegetales, que podrían ser parte de la infraestructura de espacios verdes o de la infraestructura energética, y al mismo tiempo generar consumo social, industrias o negocios locales o formar parte del planeamiento urbano como dotaciones o como espacios privados dentro de unos usos mixtos regulados ([Alonso & Pozas, 2019](#)).

A modo de concluir el epígrafe, se puede decir que la economía circular es indispensable para la sostenibilidad urbana, especialmente en áreas como la gestión de residuos, la energía y la construcción. En la gestión de residuos, busca reducir la generación de residuos en origen mediante el diseño de productos con un ciclo de vida más largo, la reutilización, el reciclaje y el compostaje. Además, implementa sistemas para recuperar materiales valiosos de los residuos, transformándolos en nuevos productos y promoviendo el uso de materiales y objetos usados en lugar de comprar nuevos. En el ámbito energético, impulsa la eficiencia energética a través de tecnologías que minimizan el consumo en edificios, transporte y otros sectores, al mismo tiempo que promueve la instalación de fuentes de energía renovable como la solar, eólica y geotérmica, y aprovecha la energía contenida en los residuos para generar electricidad o calor. La economía circular también impulsa la movilidad sostenible, favoreciendo el uso del transporte público, la movilidad activa a través de infraestructuras seguras para ciclistas y peatones, y la adopción de vehículos eléctricos para reducir las emisiones. En construcción, promueve el uso de materiales reciclados, la construcción de edificios con altas prestaciones energéticas y la reutilización de materiales de demolición, fomentando la reconstrucción de edificios existentes en lugar de construir nuevos.

1.3. Sistemas alimentarios urbanos y desarrollo sostenible.

1.3.1. Concepto e integración de los sistemas alimentarios.

Este epígrafe se adentra en la comprensión de los sistemas alimentarios como un conjunto interconectado de componentes que van más allá de la simple producción de alimentos, se analiza la evolución del concepto de sistema alimentario en el contexto de las políticas y los enfoques emergentes, destacando cómo este enfoque holístico permite comprender las interacciones entre los diferentes componentes del sistema, como la producción, el procesamiento, el transporte, la distribución, el consumo y la gestión de los residuos.

El concepto de sistemas alimentarios de manera general es amplio, abarca la seguridad alimentaria y sus componentes; disponibilidad, acceso y utilización; y que incluye los resultados sociales y ambientales de estas actividades ([FAO, 2021a](#)). De manera breve y en otras palabras, definimos sistema alimentario como los actores, instituciones y procesos que se articulan en la producción, procesamiento, distribución de alimentos, en una red densa de actores ([Briceño & Meléndez, 2021](#)).

George, en 1987, formulo una de las definiciones más integrales y la primera en incorporar la dimensión relacional entre sistemas alimentarios, prácticas sociales y ambiente, significa: “La totalidad de medios tangibles e intangibles empleados por una comunidad humana para la producción, conservación, distribución y el consumo de alimentos”, entendiendo el uso de tales medios tangibles e intangibles, para fines de la alimentación humana y tiene profundos efectos sobre el entorno, ambiente, micro y macro ecosistemas. Este autor, además, identifica la categoría de análisis de sistema alimentario dominante, sobre los sistemas alimentarios que se han visto desintegrados ([Pérez & Chomsky](#)).

En el campo de la Soberanía y Seguridad Alimentaria y Nutricional el concepto de Sistema Alimentario representa el elemento integrador y promotor. Si se trata la interrelación de los sistemas alimentarios, estos se analizan como un todo que no se puede separar en partes independientes y hay propiedades del todo que no tiene ninguna de las partes, en el cual cada elemento está relacionado por lo menos con un elemento más, directa o indirectamente. Durante las transformaciones, transacciones e interacciones producidas en el sistema alimentario, puede identificarse una serie de actividades interrelacionadas, a las cuales se va añadiendo o disminuyendo valor sucesivamente, desde la gestión de los recursos naturales y la biodiversidad hasta la gestión de las pérdidas y desperdicios de alimentos ([FAO, 2017](#)). De esta forma un sistema alimentario interactúa con una amplia gama de otros sistemas, como el sistema energético, de transporte, etc. ([FAO, 2017](#)). Dichos sistemas articulan el análisis de las diversas actividades alimentarias y recorre el flujo del alimento sin despreciar a los actores involucrados. Así, los procesos de producción, desde la siembra a la cosecha, el almacenamiento y la transformación de productos, la distribución, la comercialización y el consumo, se perciben de forma interconectada y a partir de relaciones existentes. Puesto que para que el alimento se mueva de un lado a otro y se transforme, hay que considerar la existencia de sujetos e instituciones que son los actores del sistema. Y bajo el mismo paradigma, hay necesidad de considerar que el comportamiento y las acciones de los individuos influyen en las relaciones de consumo ([GONZÁLEZ et al., 2020](#)), es decir debido a su naturaleza multidimensional, los sistemas alimentarios incluyen

aspectos socioculturales, económicos, ambientales y políticos, con actores múltiples, y manejan múltiples cadenas de valor agroalimentarias vinculadas y anidadas en ambientes dinámicos e interactivos ([FAO, 2017](#)).

El sistema alimentario actual se caracteriza por los siguientes elementos: 1) está globalizado; 2) tiene un creciente carácter industrial; 3) se ha corporativizado y concentrado, con la consiguiente capacidad de las grandes empresas de condicionar los mercados alimentarios; 4) el alimento se ha convertido en mercancía; 5) el propio sistema genera y ahonda dinámicas de pobreza y desigualdad y 6) es nocivo para la salud tanto de los seres humanos como de la biosfera. Además, es importante remarcar que durante aproximadamente el último medio siglo han tenido lugar diversas crisis alimentarias con efectos globales; entre 1972 y 1974, a finales de los 2000 e inicios de los 2010 y durante los inicios de los 2020, entre otras. Estas crisis, además de haber tenido devastadores efectos en términos de seguridad alimentaria, han contribuido a definir el propio sistema alimentario hasta conducirlo a su estadio actual ([Pérez & Chomsky](#)), el cual no ha permanecido estático, sino que ha ido evolucionando a lo largo del tiempo. Se ha observado asimismo la consolidación del modelo industrial en lo que a producción y distribución de alimentos se refiere. La corporativización y la concentración del sistema son otros elementos que lo caracterizan en la actualidad. Todo ello, por su parte, está acarreado nefastas consecuencias en la salud de las personas, pero en particular tanto socioeconómicas como ecológicas ([Pérez & Chomsky](#)).

Se reconoce una asociación estrecha entre el sistema alimentario y la posibilidad de seguridad alimentaria. Se afirma que atacar el problema de la seguridad alimentaria requiere transformaciones en los sistemas agrícolas y alimentarios locales, nacionales y globales, y a su vez atender los problemas socioambientales enfatiza la importancia de un análisis estructural de la seguridad alimentaria, lo cual requiere el examen del funcionamiento de los sistemas alimentarios ([Fletes Ocón et al., 2021](#)). Tradicionalmente la seguridad alimentaria, se ha considerado como la disponibilidad suficiente de alimentos para satisfacer las necesidades de la población. Sin embargo, la creciente complejidad del sistema alimentario actual exige una mirada más holística, para comprenderla de forma integral, es necesario abordarla desde la perspectiva de "sistema". El concepto de "seguridad alimentaria" ha ganado fuerza durante las últimas décadas como uno de los principales indicadores para estudiar el panorama en relación con la alimentación, el hambre y la nutrición. La FAO la definía a comienzos del siglo XXI de la siguiente manera: "Una situación que existe cuando todo el mundo, en todo momento, tiene acceso físico,

social y económico a alimentos suficientes, seguros y nutritivos que le ayude a satisfacer sus necesidades alimenticias para una vida activa y sana” ([Pérez & Chomsky](#)).

Este enfoque reconoce que la seguridad alimentaria no se limita a la producción de alimentos, sino que incluye aspectos como la accesibilidad, la disponibilidad, la utilización y la estabilidad de los mismos. De forma general la seguridad alimentaria garantiza a todos los seres humanos el acceso físico y económico a los alimentos básicos que necesitan para una vida activa y saludable, conlleva consecuencias multisectoriales, las que van más allá de la necesidad de producción, oferta y suministro de alimentos. Se trata de un proceso dinámico estrechamente vinculado con los temas de pobreza, capacidad humana, creación de trabajos y generación de ingresos, un espiral que puede llevarse tanto hacia arriba como hacia abajo, en continua evolución. El proceso también se reconoce en diferentes niveles: internacional, nacional, del hogar y del individuo. Incluye un análisis sistemático sobre disponibilidad alimentaria y estabilidad de la oferta, sobre las restricciones relativas al acceso de todos a los suministros, y sobre la utilización biológica de los productos alimentarios básicos ([FAO, 2004](#)). Es necesario reconocer la importancia de concebir la seguridad alimentaria en términos de sistema para enfrentar los desafíos actuales como el cambio climático, la pérdida y el desperdicio de alimentos, la deterioración de la biodiversidad y las desigualdades sociales en el acceso a los alimentos. Este análisis sentará las bases para la búsqueda de soluciones innovadoras que promuevan sistemas alimentarios más justos, sostenibles y resiliente, garantizando el acceso a alimentos seguros y nutritivos para todos.

Los sistemas alimentarios pueden alcanzar la seguridad alimentaria y nutricional, generando servicios económicos y sociales, mejorando los medios de vida y proporcionando alimentos sanos y nutritivos de manera estable para toda la población ([FAO, 2017](#)), pues para lograr la seguridad alimentaria se requiere: suministro suficiente de alimentos; estabilidad en el suministro de alimentos, durante todo el año y de un año a otro; acceso físico y económico a los alimentos, lo que requiere capacidad y recursos para producir u obtener todos los alimentos necesarios ([FAO, 2023](#)). Por otra parte, la seguridad alimentaria en cada país, incluso si el país es seguro alimentariamente, depende en parte de cuánto avanza el país para lograr una mayor equidad en los ingresos, distribución de la tierra y acceso a los servicios. Es posible que las políticas nacionales no sólo ayuden a los agricultores a lograr una mayor producción de alimentos, sino también pueden ayudar a que la población satisfaga sus demandas alimentarias ([FAO, 2023](#)).

Como se aprecia, las dimensiones del concepto mantienen un nexo directo con las precisiones derivadas en torno al derecho a la alimentación referidas arriba y las cuestiones relativas a las

obligaciones estatales, su garantía y las medidas conducentes a su realización, así como la vinculación directa con los sistemas alimentarios alternativos. Hablar de seguridad alimentaria es referirse, así sea indirectamente, a medidas tomadas por los gobiernos para garantizar el derecho a la alimentación y las principales preocupaciones en relación con el tema, generalmente se centran en dos primeras dimensiones, la disponibilidad, concentrándose en el lado de la oferta o la existencia real de alimentos, así como el acceso, concentrándose en el lado de la demanda, es decir cómo los hogares o las personas aseguran el acceso a los alimentos. Puede existir una tercera dimensión, el uso o la utilización, que se refiere a las cuestiones relacionadas no solo con la cantidad de alimentos, sino también con la calidad de las dietas y los hábitos alimentarios de las sociedades ([Arellano-Esparza, 2022](#)).

1.3.2. Sistemas alimentarios alternativos en la ciudad sostenible.

La construcción de ciudades sostenibles requiere de una profunda transformación en la forma en que producimos, distribuimos y consumimos alimentos. El modelo tradicional de sistema alimentario, basado en la producción a gran escala, el uso intensivo de recursos y el transporte a larga distancia, se ha demostrado ineficaz para construir ciudades resilientes, justas y sostenibles ya que en cada tiempo la transformación de los sistemas o regímenes alimentarios se ha situado como condición de posibilidad para la evolución de las sociedades. A la dificultad histórica de los sistemas alimentarios para proveer correctamente una alimentación universal saludable, en los regímenes modernos convergen otros problemas sociales y ecológicos sobre los que girará esta investigación, por una parte, la concentración económica del sistema agroindustrial-global y la retribución de su base productiva, por otra, una influencia significativa en el deterioro de los sistemas ecológicos, en un momento histórico de crisis ecosocial. De esta forma avanzar en un modelo alimentario capaz de satisfacer las necesidades básicas con un menor impacto ambiental y unas relaciones más justas suponen una meta social, ecológica y científica de primer orden ([Caruncho, 2023](#)).

En este contexto nacen desde la segunda mitad del siglo XX y en diversas partes del mundo los sistemas alimentarios alternativos. Relaciones alimentarias asentadas en un mayor equilibrio y soberanía productor-consumidor mediante esquemas más próximos y menos intermediados ([Caruncho, 2023](#)). También son comúnmente vinculados al concepto de Sistemas Agroalimentarios Locales, con frecuentes referencias a los sistemas alimentarios regionales o locales. Sin embargo, la categoría de “local” ha sido cuestionada como una categoría socialmente construida, y por lo tanto móvil y frágil. También ha sido discutido su potencial para generar, pero se, mejora

de los impactos sociales y ecológicos para el desarrollo rural de los sistemas alimentarios alternativos ([Caruncho, 2023](#)).

Los Sistemas Alimentarios Alternativos han sido caracterizados como una forma de reequilibrar las relaciones de poder presentes a lo largo de la cadena alimentaria, que determinan la orientación de los flujos alimentarios y su sustentabilidad ([Caruncho, 2023](#)). En las últimas décadas, la creciente globalización de la distribución agroalimentaria ha multiplicado los impactos sociales y ecológicos, con una distribución desigual a escala global. A su vez ha reforzado la crisis de distintos operadores de la cadena de distribución tradicional, que ven cómo se reduce su participación en el mercado agroalimentario. Entre ellos, cabe destacar el pequeño comercio tradicional y los pequeños productores agroalimentarios, cuyo número se ha reducido drásticamente.

Los sistemas alimentarios tradicionales y los alternativos representan dos modelos contrastantes en la producción y consumo de alimentos, con implicaciones profundas en la sostenibilidad ambiental, la salud pública y la economía. El sistema tradicional se caracteriza por una producción a gran escala en monocultivos, con altos niveles de insumos externos como fertilizantes sintéticos y pesticidas. La distribución es larga y compleja, implicando transporte a largas distancias y cadenas de intermediarios, lo que genera mayores costos y huella ambiental ([Forum, 2015](#)). En el ámbito ambiental genera una huella significativa por la deforestación, el uso intensivo de agua, la contaminación del suelo y el aire, y la emisión de gases de efecto invernadero ([IPCC, 2021](#)). Además de promover el consumo de alimentos procesados, ricos en azúcares, grasas saturadas y sal, lo que contribuye a la obesidad, enfermedades crónicas y deficiencias nutricionales ([HHS, 2020](#)). Concentra la riqueza en grandes empresas agroindustriales, dejando poco espacio para la agricultura familiar y el desarrollo local ([Science, 2021](#)). Y desde el punto de vista de la resiliencia es vulnerable a los efectos del cambio climático, como el aumento de las temperaturas, la sequía y las inundaciones ([FAO, 2018](#)). Mientras el sistema alimentario alternativo se basa en la producción local a pequeña escala, priorizando la agroecología, la diversidad de cultivos y la reducción de insumos externos. La distribución se realiza a través de canales cortos, como mercados de agricultores, sistemas de cestas comunitarias y plataformas online, fomentando el consumo responsable y la conexión directa entre productores y consumidores ([FAO, 2014](#)). Minimiza el impacto ambiental al promover prácticas sostenibles como la agricultura orgánica, la gestión eficiente del agua, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la reutilización de residuos orgánicos ([PNAS, 2018](#)). En esferas de la salud pública fomenta el consumo de alimentos frescos, de temporada y de origen local, con un mayor valor nutricional y

menor riesgo de contaminantes ([WHO, 2019](#)). Desde la perspectiva de desarrollo local impulsa la economía local, creando empleos, fomentando la agricultura familiar y fortaleciendo la soberanía alimentaria ([Bank, 2016](#)). Y por último es más resiliente al cambio climático, gracias a la diversidad de cultivos, la gestión eficiente del agua, la agricultura orgánica y la producción local, lo que reduce la dependencia de sistemas de producción a larga distancia ([Routledge, 2014](#)).

Los sistemas alimentarios alternativos surgen como respuesta ante los problemas que generan los sistemas convencionales, globales e industriales. Una de sus expresiones son las redes alimentarias alternativas (RAA), las cuales se diferencian del aprovisionamiento industrial porque operan con distancias cortas entre consumidores y productores; manejan la agricultura a pequeña escala con métodos ecológicos; y se comprometen con las dimensiones sociales, económicas y ambientales de la producción, distribución y consumo de alimentos ([Atehortúa Hernández, 2020](#)). Estudios explican que todas las redes alternativas de alimentos comparten tres rasgos comunes: a) redistribuyen valor a través de la red en la dirección opuesta al sistema de acumulación de productos; b) reinstalan la confianza entre el productor y el consumidor; y c) articulan nuevas formas de asociación política y gobernanza del mercado. Las RAA propician proximidad geográfica al distribuir alimentos que proceden de zonas rurales cercanas, pero muy especialmente reconectan los actores del sistema, con lo que logran que se establezcan relaciones humanas, además de comerciales, entre productores, distribuidores y consumidores de alimentos. En síntesis, las RAA relocalizan, reintegran y reconectan la producción y el consumo de alimentos ([Cadavid-Castro et al., 2019](#)). Las RAA se pueden definir como modalidades de abastecimiento alimentario que, frente al modelo hegemónico de la producción industrial y la gran distribución, abogan por nuevas formas de relación y colaboración productor-consumidor. Estas se presentan como una oportunidad para los productores, quienes, al buscar desvincularse de un sistema alimentario globalizado y financiado, se conectan a través de canales cortos de comercialización con unos consumidores que, por diferentes motivaciones (salud, ecología, política, ética e, incluso, por moda), persiguen la soberanía alimentaria, la seguridad, la calidad, lo natural, lo ecológico, la justicia social, lo artesanal, la proximidad y la autenticidad en la alimentación. Entre las RAA se encuentran toda una variedad de iniciativas, tales como agrupaciones de productores, mercados de productores, cooperativas, grupos de consumo agroecológicos, huertos colectivos ([Gema Gonzalez Romero, 2021](#)).

El carácter “alternativo” de las redes alimentarias es puesto en cuestión si se consideran en el análisis las relaciones que se dan avanzando desde el eslabón de la producción hasta el consumo y desecho finales (downstream), como procesado y distribución a través de intermediarios, donde

se dan frecuentes interacciones entre actores alternativos y convencionales en muy distintas formas adaptadas a cada contexto. A su vez, considerando la dimensión hacia arriba de la cadena (upstream, provisión de insumos y medios de producción), que a menudo son altamente dependientes de bienes y servicios ajenos al medio local y altamente industrializados. Diversos autores hablan de redes alimentarias “híbridas” en las que los distintos actores de la cadena productiva entran y salen en función de imperativos económicos y de los condicionantes estructurales del territorio en que se insertan ([Caruncho, 2023](#)).

Desde esta perspectiva, la dicotomía entre lo convencional y lo alternativo se rompe, y los distintos actores desde la producción hasta el consumo negocian las prioridades económicas y sociales en los sistemas alimentarios locales, en función de objetivos y posibilidades percibidas. Esta negociación se vuelve una clave central en la lucha de los actores locales por avanzar hacia la sostenibilidad y mantener el control de la cadena de valor del producto, frente al mercado global, determinando la condición de actores de naturaleza híbrida en la participación en las redes alimentarias. Las cadenas híbridas no significan necesariamente redistribución de poder ni de denominado un proceso de “convencionalización” ([Caruncho, 2023](#)).

Las ciudades, como motores del crecimiento económico y centros de población, enfrentan una serie de retos que ponen en peligro su propia sostenibilidad. La creciente demanda de alimentos, la dependencia de cadenas de suministro globales y la presión sobre los recursos naturales son solo algunos ejemplos. En este contexto, los sistemas alimentarios alternativos no solo son una opción viable, sino una necesidad imperante para construir ciudades más resilientes, equitativas y sostenibles. Cada ciudad es particularmente vulnerable a interrupciones en la cadena de suministro, como pandemias, desastres naturales o conflictos. Los sistemas alimentarios tradicionales, altamente centralizados y dependientes de largas distancias, se vuelven frágiles ante estas situaciones. Los sistemas alternativos, con producción local y redes de distribución más cortas, ofrecen una mayor seguridad alimentaria y una capacidad de respuesta más rápida ante emergencias ([Centre, 2018](#)). De igual manera existen ciudades con poblaciones en crecimiento y con altos índices de pobreza que a menudo enfrentan problemas de acceso a alimentos nutritivos y asequibles, y estos sistemas pueden reducir los costos de transporte, aumentar la disponibilidad de alimentos frescos y diversificar la oferta alimentaria, mejorando el acceso a dietas más saludables para la población urbana ([Security, 2015](#)). Los métodos alternativos, como los huertos urbanos y las granjas verticales, promueven la conexión con la naturaleza y el aprendizaje sobre la producción de alimentos, fomentando una mayor conciencia

sobre el impacto de nuestras elecciones alimentarias y la importancia de la sostenibilidad ([FAO, 2014](#)).

En relación con los aspectos socioeconómicos estos sistemas alimentarios alternativos despertaron interés por sus potencialidades para captar mayores rentas, mejorar precios percibidos o aumentar el empleo rural. Por otra parte, también se han relacionado con integraciones más ecológicas como la agroecología o la ganadería regenerativa, respeto estricto de las temporadas, predominancia de productos frescos, racionalización de los sistemas de distribución en proximidad, etc. Estas relaciones convergen además en los últimos años con el surgimiento del enfoque de la Economía circular y el impulso por parte de la UE a un sistema más sostenible ([Caruncho, 2023](#)).

Es necesario resaltar la importancia de los flujos de información y los atributos en torno a estos sistemas y sus alimentos. También se ha destacado la necesidad de una presencia mínima de intermediarios entre productores y consumidores, cobra especial relevancia la concepción sociopolítica de la soberanía alimentaria y el avance hacia un mayor empoderamiento de los agentes dentro de estos sistemas. Única característica que en ningún grado podrá ser imitada o alcanza por los agentes hegemónicos de los modelos convencionales. Los sistemas alimentarios alternativos a modo de conclusión pueden ser definidos como un conjunto de relaciones alimentarias en las que productores y consumidores poseen su gobernanza principal y comparten información relevante en un marco de proximidad practicable ([Caruncho, 2023](#)). La implementación de dichos sistemas contribuye a la seguridad alimentaria, la salud pública, la economía local, la reducción de la huella ambiental y la conexión con la naturaleza, convirtiéndose en un pilar fundamental para el futuro de nuestras ciudades.

1.4. Ciclos claves de metabolismo urbano circular en el sistema alimentario alternativo.

1.4.1. Enfoque cíclico del metabolismo urbano circular.

Las ciudades, como organismos complejos, se sustentan en un flujo constante de recursos y materiales. El concepto de metabolismo urbano, al analizar estos flujos, nos ofrece una visión holística de las relaciones entre la ciudad y su entorno. Estos ciclos representan los pilares fundamentales para construir ciudades más eficientes, resilientes y sostenibles, identificando las oportunidades y los desafíos para optimizar su funcionamiento y cerrar los bucles de materiales y recursos.

En lo global, los ciclos están definidos por un macrociclo que interrelaciona los ritmos de la naturaleza con los humanos. En los últimos 150 años se ha ido debilitando la homeostasis de la

sociedad humana, entendido como la pérdida del equilibrio ante las distintas demandas o dificultades, tanto internas como externas, sobre todo con los ciclos de la naturaleza ([Rodríguez de la Presa, 2021](#)). Esto es particularmente importante en el caso de las ciudades, dado que constituyen sistemas abiertos a flujos de materiales y energía ([Jacob Cirera, 2020](#)).

Es por ello que también se asientan los enfoques que ven a la ciudad como un organismo necesitado de recursos externos para funcionar (materiales, insumos básicos, energía y otros), los cuales son transformados por diversos procesos urbanos (producción industrial y no industrial, construcción, transportación, gestión de residuos y una multiplicidad de otros procesos esenciales para el funcionamiento de la ciudad), lo que genera residuos y subproductos (residuales líquidos y sólidos, emisiones atmosféricas, calor, ruido y otras formas de contaminación) ([Águeda, 2015](#); [Christopher Kennedy, 2007](#)).

A partir de estos conceptos, es posible entender un conjunto de requerimientos metabólicos que deben ser cumplidos por la ciudad para garantizar su sustentabilidad y sostenibilidad:

- El aumento de la temperatura ha ido provocando el aumento sostenido de la humedad relativa global, así como gestión del agua, desde su captación hasta su tratamiento y reutilización, impacta directamente en la salud pública, la seguridad alimentaria, la calidad ambiental y la economía de las ciudades, donde es clave garantizar el acceso a agua potable para la población, permitir identificar las fuentes de agua disponibles, evaluar su calidad y desarrollar estrategias para asegurar el suministro de agua potable en cantidad y calidad adecuadas, todo lo cual se refleja en un ciclo metabólico urbano particular ([Rodríguez de la Presa, 2021](#)).
- La energía es consustancial a la existencia y desarrollo de la vida urbana, impulsa todos sus procesos, desde el transporte hasta la producción industrial y la vida cotidiana. No solo afecta la eficiencia y el bienestar de la ciudad, sino que también impacta directamente en la calidad del aire, la salud pública y el cambio climático. El ciclo metabólico energético, donde concurren modelos tradicionales (basados en combustibles fósiles) y la generación de energía mediante fuentes no renovables, requiere articularse con la gestión, el ordenamiento y la conservación de la ciudad en una perspectiva de desarrollo sostenible.
- La gestión de residuos urbanos, que es mucho más que un proceso de recolección y eliminación, constituye un pilar fundamental para la sostenibilidad, la salud pública y el desarrollo económico. El manejo inadecuado de los residuos contamina el aire, el agua y el suelo, sin dejar de mencionar que la contaminación a la fauna y flora. Reciclar y reutilizar

reduce la necesidad de extraer recursos de la propia ciudad o aumentar el flujo de entrada en un concepto de metabolismo global.

La determinación por indicadores del comportamiento del metabolismo circular urbano es un proceso complejo, tanto en lo conceptual como en la captación, interpretación y sistematización de grandes volúmenes de datos e información estadística de diversas fuentes confiables. Los objetivos del presente trabajo de diploma no llegan a tales niveles, por cuanto se escapa a sus posibilidades; sin embargo, es importante dar elementos indicativos que ayuden a tener una idea más realista de la sostenibilidad urbana a partir de estos conceptos.

Analizando diversas fuentes, a partir de esta posición, se encuentra a [Jacob Cirera \(2020\)](#), citando a [Pallasco \(2023\)](#) cuando expresan que “el enfoque metabólico concibe a la sociedad en íntima relación con la naturaleza a través de los flujos de materia y energía, donde apropiación y excreción constituyen los actos inicial y final del metabolismo entre la sociedad y la naturaleza”. Esto permite reconocer que, en un sistema alimentario, el análisis de su metabolismo exige determinar la relación entre recursos ingresados y recursos desechados”. En conocimiento referido al consumo de agua y energía, así como la consecuente producción de residuos.

Con relación a la aplicación de indicadores en el análisis del metabolismo de los residuos urbanos, [Rodríguez de la Presa \(2021\)](#) abogan por conocer la relación entre los volúmenes de entrada material para los diferentes procesos en la ciudad y la salida de los residuos, contemplados en dos destinos: residuos biodegradables que van a los vertederos y aquellos que logran ser reciclados (como materiales o como compostaje, en el caso de los orgánicos).

En una propuesta de índices para el estudio del metabolismo urbano de la zona metropolitana de la ciudad mexicana de Toluca, [Pallasco \(2023\)](#) precisan algunos indicadores a tener en cuenta en los ciclos metabólicos. Para el ciclo de la energía, ponen su atención en el consumo de electricidad y de combustibles (transportación urbana). En el caso del ciclo del agua, se enfocan en el consumo de dicho líquido, contra pérdidas en el sistema hasta llegar a su destino; así como el comportamiento del volumen de las aguas residuales no recicladas. Finalmente, para el ciclo de los residuos urbanos, estudia la relación de entrada material a los procesos y las salidas a vertederos y a reciclaje.

En esta misma fuente, es interesante la propuesta del denominado “semáforo de índices metabólicos”, a partir de cuatro niveles (rojo, naranja, amarillo y verde, en un código de peor a mejor). Reservan el código verde para el metabolismo bajo, cuando el consumo material es bajo, al igual que los índices de contaminación. El otro extremo, el código rojo, se reserva para un

metabolismo alto, donde estos niveles son insostenibles en el mediano y largo plazo ([Pallasco, 2023](#)).

En un estudio multilateral participativo realizado por la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, organismo estatal de España, se determinó un sistema municipal de indicadores de sostenibilidad. Uno de sus secciones fue la de Metabolismo Urbano, donde reconocieron los siguientes indicadores en los tres ciclos básicos: agua, energía, residuos urbanos ([Pallasco, 2023](#)).

En el ciclo del agua se precisó su consumo urbano y las pérdidas en la red de distribución. También los volúmenes de agua depuradas y aquellas que quedan como residuales; así como la determinación del agua que llega a ser reutilizada, con el debido tratamiento.

En el ciclo de la energía se centra en el consumo final de energía y la determinación de las proporciones de la que se produce mediante fuentes renovables y la tradicional.

Respecto al ciclo de los residuos urbanos, el estudio se dirige a la determinación de los volúmenes de residuos, distinguiendo los que van al destino final de vertedero y aquellos que logran ser reutilizados, teniendo en cuenta también el factor contaminante.

A partir de estas y otras fuentes consultadas y referidas en el presente capítulo, se reconocen elementos a tener en cuenta para lograr una apreciación preliminar del metabolismo de los sistemas alimentarios alternativos (SAA) para el caso de la ciudad.

También se toma como referencia el material “Dimensiones y variables para la caracterización de la vinculación de un emprendimiento alimentario alternativo con el sistema urbano” producido en la investigación del Proyecto Sustento que se desarrolla en la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas ([Olivera, 2023](#)).

1.4.2. Ciclo del agua en los SAA.

En la producción alternativa de alimentos y las otras fases componentes de dicho sistema, como es el procesamiento, la distribución, hasta llegar a su consumo, el agua juega un rol esencial, tanto para lograr el desarrollo y logro de los cultivos, como de los procesos donde se emplea para formar parte del producto final o como parte de las operaciones diversas que se realizan.

A partir de estos criterios y de las fuentes utilizadas, se identifican los siguientes elementos de análisis para el metabolismo circular urbano en este ciclo:

- a. Consumo de agua: Determinar el agua que entra en el sistema, que a los efectos de los servicios urbanos, es conveniente que se diferencie, según su condición, en el agua

potable y la que no tenga esa exigencia. Esta determinación puede hacerse en términos de caudal, es decir su volumen por unidad de tiempo.

- b. Procedencia del agua de consumo: Es significativo, no solo para conocer el metabolismo, sino la propia capacidad de la ciudad para responder a las demandas, que se determine si el agua utilizada proviene de la red urbana de acueducto (servicio público) o de otras fuentes, como son los pozos u otras variantes similares también públicas, o en su defecto de otra procedencia diferente al sistema urbano de abasto de agua.
- c. Reutilización del agua: Factor clave para el metabolismo circular, en tanto los procesos que permiten el reuso del agua que entra al balance, lo que permite una circularidad del ciclo. En esto es adecuado determinar si el agua de reutilización demanda de tratamiento específico para su reciclaje.
- d. Aguas residuales: Es el agua que sale del sistema, o sea, la contraparte de la de entrada (input/output). También se determina mediante volumen por unidad de tiempo (caudal) y es importante conocer si toda o parte de ella posea factores contaminantes que pueden impactar ambiental o sanitariamente en la ciudad y sus infraestructuras.
- e. Destino de las aguas residuales: El agua de salida debe tener un destino final que es significativo para el contexto urbano. Importante conocer si son las redes e infraestructuras urbanas existentes (drenaje de la ciudad), si se vierten en suelo y/o vías de agua o al mar o si existen soluciones o dispositivos específicos de tratamiento independientes de la red urbana existente.

1.4.3. Ciclo de la energía en los SAA.

La energía eléctrica está presente en todos los procesos del SAA, tanto en lo referente a la necesaria para el riego de plantaciones, como de potencia para equipos y maquinarias que se empleen en otras actividades del sistema. También puede encontrarse demandas de otros tipos de energía para la producción de vapor, calor y otras demandas (por ejemplo, en el caso de calderas, cocinas, etc.). En cuanto a las demandas de transportación, también se requiere consumo de portadores energéticos (combustibles), todo lo cual gira contra las posibilidades de las infraestructuras y servicios urbanos. A los efectos de este estudio, se tendrá en cuenta solamente la energía eléctrica.

Elementos de análisis:

- a. Consumo de energía eléctrica: Se determina según el sistema existente en los proveedores públicos de la energía de la ciudad, que tiene una estadística clara a

partir de las facturas por consumo de los consumidores, sean personas naturales o institucionales. Puede ser significativa la diferencia y ese consumo se requiere con las potencias usuales en el servicio urbano (110, 220 W) u otros parámetros mayores (440 W o superior).

- b. Procedencia de la energía de la energía de consumo: Es un dato importante para llegar a la carga sobre los servicios urbanos existentes. Si procede de la red del servicio público urbano gravita en el balance de carga general. También puede ser obtenida de plantas generadoras propias o proceder informalmente de soluciones improvisadas derivadas de la red pública, lo que constituye una violación de las regulaciones.
- c. Consumo de energía eléctrica a partir de fuentes renovables: Es un factor clave en la determinación del balance metabólico de la energía. Los casos en análisis pueden aplicar cualquiera de las variantes disponibles: energía solar (paneles, calentadores, etc.), energía eólica (aerogeneradores individuales), energía hidráulica (plantas hidroeléctricas) u otras.

1.4.4. Ciclo de los residuos sólidos urbanos en los SAA.

Todas las etapas o actividades de los SAA generan desechos de diferente naturaleza. En cuanto a los desechos sólidos, muchas veces tienen potencialidades importantes de ser reciclados o reutilizados, tanto mediante procesamiento o de la misma forma en que se producen, ya que son orgánicos o susceptibles de biodegradarse. En actividades de tipo transformativo, pueden producirse residuos de procesos industriales o semiindustriales que requieren otro tratamiento.

- a. Residuos sólidos producidos: Este dato cuantitativo usualmente se determina mediante el peso, el volumen u otra unidad de medida, asociado a un período de tiempo dado. Se ha hecho necesario llegar también a una diferenciación de estos residuos, donde se ha hecho usual en biodegradables o no biodegradables, aunque también se hace en función del tipo de material (metal, vidrio, papel, orgánicos, etc.)
- b. Reciclaje de los residuos: Importante para el balance metabólico. Pueden ser reciclados en el propio proceso del caso de estudio, o ser destinados a su reutilización en otros destinos
- c. Destino final de los residuos no reciclados: La llamada disposición final, que puede constituir un serio problema para la ciudad en su metabolismo. El mejor caso es cuando estos desechos se dirigen a los vertederos o puntos de recolección del servicio

público urbano, o a soluciones propias efectivas (sin afectación o contaminación en suelo, aire ni aguas). La peor situación es cuando toma destinos no formales (basurales, quema, enterramiento, vertimiento informal, etc.)

1.5. Conclusiones parciales:

El estudio del metabolismo urbano y su relación con la economía circular se ha consolidado como una herramienta fundamental para comprender la sostenibilidad de las ciudades modernas. Este enfoque permite analizar las ciudades como organismos que consumen recursos y generan desechos, lo que es esencial para optimizar los flujos de recursos y residuos. El metabolismo urbano no solo proporciona una perspectiva holística sobre cómo las ciudades funcionan y evolucionan, sino que también identifica áreas de mejora en la eficiencia del uso de recursos, lo que contribuye a la reducción de residuos y minimiza el impacto ambiental. Esta integración de conceptos es crucial para alcanzar un desarrollo urbano más sostenible.

La economía circular complementa este enfoque al proponer estrategias concretas para optimizar los flujos de recursos a través de la reducción, reutilización y reciclaje. Este modelo se presenta como una alternativa al sistema económico lineal tradicional, que tiende a agotar los recursos naturales y genera grandes cantidades de residuos. La economía circular busca crear un sistema regenerativo donde los materiales sean reutilizados al máximo, lo que no solo conserva los recursos, sino que también reduce la generación de desechos. Implementar un modelo circular en las ciudades puede tener un impacto significativo, no solo al disminuir la presión sobre los recursos naturales, sino también al fomentar la innovación empresarial, el desarrollo económico y la creación de empleo en sectores emergentes.

Un aspecto crucial que se deriva de esta integración conceptual es que la implementación de estos enfoques en la planificación urbana requiere la participación de múltiples actores. La colaboración entre gobiernos, empresas, ciudadanos y la academia es esencial para facilitar una transición efectiva hacia modelos sostenibles. Este enfoque multisectorial garantiza que los beneficios de la sostenibilidad urbana sean percibidos y compartidos por toda la población. Además, los gobiernos deben adoptar una visión a largo plazo, priorizando inversiones en infraestructura verde, transición energética y gestión sostenible de recursos, en lugar de soluciones inmediatas pero insostenibles. Esto implica un cambio paradigmático en la forma en que se gestionan las ciudades, moviéndose hacia un modelo que prioriza el bienestar de la comunidad y el medio ambiente.

La transición hacia ciudades sostenibles también implica cambios profundos en la gestión del consumo de energía, el agua y el tratamiento de residuos. Las ciudades del futuro deben comprometerse a adoptar fuentes de energía renovable, optimizar los sistemas de distribución y consumo energético, e incorporar tecnologías que aumenten la eficiencia en el uso de recursos. Por ejemplo, la implementación de sistemas de captación y reutilización del agua es crucial, especialmente en áreas propensas a la escasez. En este sentido, es vital que las políticas públicas promuevan no solo la gestión eficiente del agua, sino también su conservación y reutilización. La gestión de residuos, un tema central en el metabolismo urbano, requiere sistemas integrales que fomenten el reciclaje, el compostaje y otras prácticas que minimicen la cantidad de desechos enviados a vertederos. Esto no solo contribuye a la sostenibilidad, sino que también crea conciencia sobre la importancia de un manejo responsable de los recursos.

La educación y participación ciudadana son otros elementos clave en la transición hacia un modelo de economía circular urbana. Es fundamental que la población esté sensibilizada sobre la importancia de adoptar prácticas sostenibles en su vida diaria, como el reciclaje y el consumo responsable. Fomentar la participación activa de los ciudadanos en iniciativas locales no solo facilita la adopción de modelos circulares, sino que también crea un sentido de comunidad y responsabilidad compartida. La educación ambiental debe ser una parte integral de los programas escolares y de las campañas de sensibilización comunitaria, asegurando que las futuras generaciones estén preparadas para vivir en ciudades sostenibles.

Además, los sistemas alimentarios alternativos se presentan como una respuesta integral a los problemas del modelo tradicional. Estos sistemas abogan por una producción y distribución más local, lo que impacta positivamente en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental. Al reducir la dependencia de largas cadenas de suministro, se incrementa la resiliencia ante crisis, garantizando un acceso más directo a alimentos y promoviendo la soberanía alimentaria. Desde el punto de vista ambiental, estos sistemas minimizan la huella ecológica al reducir las emisiones de carbono asociadas con el transporte y fomentar prácticas agrícolas sostenibles, contribuyendo así a la conservación de la biodiversidad.

En otras palabras, la integración del metabolismo urbano y la economía circular en la planificación y gestión de las ciudades es un paso esencial hacia el desarrollo sostenible. Estos enfoques permiten optimizar el uso de recursos y reducir los impactos negativos en el medio ambiente, al mismo tiempo que abren oportunidades para la innovación y el crecimiento económico. La clave para lograr ciudades sostenibles reside en la colaboración multisectorial, una visión a largo plazo y el compromiso de los ciudadanos para adoptar prácticas responsables en su vida cotidiana.

Esta sinergia entre los distintos actores y sectores no solo garantizará un futuro más resiliente y equitativo, sino que también establecerá la sostenibilidad y resiliencia como principios fundamentales en la gestión urbana. En última instancia, las ciudades deben ser vistas como sistemas complejos y dinámicos, donde el metabolismo urbano y la economía circular se entrelazan para crear un entorno urbano más sostenible y justo para todos.

CAPÍTULO II. ELEMENTOS DE ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS ALIMENTARIOS ALTERNATIVOS A PARTIR DE LOS CICLOS DE METABOLISMO URBANO CIRCULAR

2.1. El metabolismo urbano circular como vía para la sustentabilidad de los sistemas alimentarios en el contexto de la ciudad.

El debate sobre la relación entre los conceptos de "sostenibilidad" y "sustentabilidad" ha cobrado relevancia en la discusión contemporánea acerca del desarrollo urbano. Aunque ambos términos son frecuentemente utilizados como sinónimos, es crucial distinguir entre ellos para una comprensión más profunda de sus implicaciones. El "desarrollo sostenible" se centra en el crecimiento económico y busca mantener este crecimiento mediante la conservación del medio ambiente, mientras que el "desarrollo sustentable" se enfoca en la capacidad de gestionar los recursos naturales de manera que se protejan tanto el entorno como los derechos de las futuras generaciones ([Jaime Ernesto Rivera-Hernández, 2017](#); [Riechmann, 1995](#)). Esta diferenciación se traduce en enfoques divergentes sobre cómo construir ciudades que no solo sean sostenibles, sino que también puedan sustentarse a largo plazo ([Jaime Ernesto Rivera-Hernández, 2017](#)).

La literatura especializada sugiere que la distinción entre desarrollo sostenible y sustentable no se limita a un debate semántico, sino que refleja posturas ideológicas. Los países desarrollados tienden a adoptar un enfoque de desarrollo sostenible que mide el progreso en términos económicos, mientras que el desarrollo sustentable plantea una transformación radical en la producción y distribución de recursos ([Rodríguez, 2006](#)). Esta diferencia radica en cómo cada enfoque aborda la intersección entre desarrollo y conservación. La ética del desarrollo sustentable presenta una clara distinción con el enfoque de desarrollo sostenible. Mientras que este último busca un equilibrio entre los intereses del mercado, el Estado y los ciudadanos, la ética sustentable aboga por un modelo de bien común que no dependa de una racionalidad económica que a menudo favorece a unos pocos. Esta diferencia subraya la importancia de considerar aspectos sociales y políticos en la discusión sobre desarrollo, pues las decisiones

sobre cómo se gestionan los recursos tienen implicaciones directas sobre la vida de las personas y su entorno ([Barrios, 2007](#); [Gallopín, 2003](#)).

Si se analiza el origen de los conceptos de sostenibilidad y sustentabilidad se remonta a la década de 1970, época en la que comenzaron a surgir críticas al modelo de crecimiento económico tradicional. Maurice Strong, del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUMA), introdujo el término "Ecodesarrollo", que fue posteriormente ampliado por Ignacio Sachs. Este concepto buscaba armonizar el aumento de la producción con el respeto por los ecosistemas, reconociendo la necesidad de conservar las condiciones de habitabilidad del planeta ([Riechmann, 1995](#)). La evolución del concepto de desarrollo sostenible se consolidó en el Informe Brundtland de 1987, que definió la sostenibilidad como "satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades" ([Brundtland, 1987](#)). Sin embargo, esta noción ha sido objeto de controversia. En su intento de equilibrar crecimiento económico y cuidado ambiental, muchos han interpretado el desarrollo sostenible como un permiso para continuar con prácticas de explotación de recursos, lo que ha llevado a cuestionar la viabilidad del modelo ([Naredo, 1996](#)).

Desde una perspectiva biológica, la sostenibilidad se refiere al equilibrio entre una especie y los recursos de su entorno. Este concepto ha sido adaptado para abordar cuestiones más amplias relacionadas con el desarrollo humano. Por su parte, "sustentable" tiende a englobar visiones más holísticas y éticas del desarrollo ([Jaime Ernesto Rivera-Hernández, 2017](#)). Este matiz lingüístico es relevante, ya que la Real Academia Española reconoce que "sostenible" está relacionado con la capacidad de sostenerse, mientras que "sustentable" se vincula a la idea de sustentar o apoyar.

Para que el desarrollo sustentable sea una realidad, es imprescindible impulsar un enfoque endógeno y participativo en la gestión de proyectos. Esto incluye la necesidad de fórmulas innovadoras y creativas de asociación local que alineen las capacidades y valores necesarios para un desarrollo sustentable. Las dimensiones del desarrollo humano y las condiciones de vida de la población deben ser prioritarias, ya que son estas dimensiones las que potencian un desarrollo duradero ([Herranz, 2007](#)) citado por [Seller \(2012\)](#). La integración de estos principios en el desarrollo local requiere un mayor control democrático y transparencia. La participación real y efectiva de los ciudadanos en las decisiones que afectan su entorno es crucial para el éxito de cualquier iniciativa de desarrollo sustentable ([Seller, 2012](#)). La Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (OEI) destaca la importancia de

acciones concretas que los ciudadanos pueden llevar a cabo para contribuir a la sustentabilidad ([Vilches, 2012](#)).

La implementación de indicadores de sustentabilidad se vuelve esencial para medir el impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente. Estos indicadores incluyen la reducción de la utilización de recursos renovables y no renovables, la preservación de la diversidad biológica y cultural, y la capacidad de carga de los ecosistemas ([Bergh, 1996](#)) citado por [Gallopín \(2003\)](#). El enfoque ético propuesto resalta la importancia de considerar el respeto por la naturaleza y las generaciones futuras, fomentando un cambio hacia una mayor equidad intrageneracional y una preocupación ecocéntrica. Así, se puede concebir el desarrollo sustentable como un proceso que transita desde el no desarrollo hacia el crecimiento económico, y finalmente hacia un desarrollo que se realiza sin crecimiento económico material. Esto implica la gestión consciente de recursos naturales, humanos y sociales, buscando siempre una mejor calidad de vida sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones ([Martins, 2006](#)).

El equilibrio entre las dimensiones social, económica y medioambiental debe ser una constante en esta búsqueda, reconociendo que el tiempo es un factor crítico en la planificación y ejecución de estrategias de desarrollo. Al integrar estos enfoques, se podrán establecer modelos de desarrollo urbano que no solo respondan a las necesidades inmediatas, sino que también garanticen un futuro sostenible y equitativo.

La concepción de una ciudad sostenible para el futuro va más allá de satisfacer las necesidades básicas de sus habitantes a través de un desarrollo urbano eficiente; implica también la creación de un sistema alimentario que sea tanto eficiente como sustentable. Este sistema alimentario debe incluir la producción local de alimentos y la importación de recursos desde el exterior, en un contexto global donde la crisis alimentaria se ha vuelto una preocupación central ([FAO, 2021b](#)). Es fundamental que la integración de sistemas alimentarios en el espacio urbano no se realice de manera indiscriminada, sino que se planifique cuidadosamente para armonizar con la sostenibilidad del entorno urbano.

La crisis alimentaria actual se manifiesta en diversas formas: inseguridad alimentaria, malnutrición, y una dependencia excesiva de sistemas agrícolas y de distribución que a menudo son insostenibles. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), cerca de 690 millones de personas sufren hambre en el mundo, una cifra que se ha incrementado en los últimos años debido a factores como el cambio climático, conflictos y crisis económicas ([FAO, 2021b](#)). En este contexto, es esencial desarrollar un enfoque que

considere la producción y el consumo de alimentos de manera integral y holística. El concepto de metabolismo urbano sostenible se presenta como una herramienta clave para abordar estas necesidades. Este enfoque permite analizar y optimizar los flujos de materiales y energía dentro de las ciudades, facilitando la producción, procesamiento y distribución de alimentos de manera que se reduzcan los desechos y se maximice la eficiencia de los recursos ([Newton, 2013](#)). En lugar de ver la producción y el consumo de alimentos como procesos aislados, el metabolismo urbano sostenible promueve un entendimiento interconectado que incluye la gestión de recursos hídricos, la utilización de energía renovable y la implementación de prácticas agrícolas urbanas.

Una de las formas en que se puede implementar este enfoque es a través de la agricultura urbana, que no solo contribuye a la producción de alimentos frescos, sino que también promueve la cohesión social y el desarrollo económico local ([Burt, 2018](#)). Proyectos de agricultura comunitaria y huertos urbanos pueden generar empleo, fomentar la educación ambiental y proporcionar acceso a alimentos saludables a poblaciones vulnerables. Además, estos sistemas alimentarios locales pueden reducir la huella de carbono asociada al transporte de alimentos, un aspecto crítico en la lucha contra el cambio climático. Sin embargo, la integración de estos sistemas en el tejido urbano requiere de una planificación cuidadosa. Deben considerarse factores como la calidad del suelo, el acceso a recursos hídricos y las necesidades específicas de la comunidad. La implementación de políticas públicas que apoyen la agricultura urbana, así como la creación de espacios verdes y la revitalización de terrenos abandonados, son pasos esenciales para lograr una ciudad verdaderamente sostenible ([Gordon, 2018](#)). Además, es crucial fomentar la participación activa de la comunidad en la toma de decisiones relacionadas con la gestión de sus recursos alimentarios, asegurando que las soluciones implementadas sean adaptadas a las realidades locales y reflejen las necesidades de sus habitantes.

En conclusión, la intersección entre sostenibilidad y sustentabilidad es clave para construir ciudades resilientes y justas. Es esencial que las ciudades integren sus sistemas alimentarios de manera que armonicen con sus objetivos de sustentabilidad, aprovechando enfoques como el metabolismo urbano sostenible. Solo así se podrá avanzar hacia un futuro donde el desarrollo y la conservación se conviertan en aliados en la búsqueda de un equilibrio que asegure la habitabilidad del planeta para las generaciones venideras. La educación, la innovación y la participación activa de la comunidad son elementos fundamentales en este proceso, que debe ser guiado por principios éticos que prioricen la justicia y la equidad.

2.2. Evaluación de indicadores de metabolismo urbano.

El análisis y evaluación del metabolismo urbano constituyen tareas de alta complejidad, que demandan el uso de métodos y vías diversas para comprender los flujos de energía, recursos, y residuos dentro de las ciudades. Estas evaluaciones requieren la recolección y manejo de grandes volúmenes de datos estadísticos, intencionalmente registrados y publicados, que permiten monitorear cómo los entornos urbanos utilizan y transforman sus insumos. Además, el proceso suele involucrar un enfoque multidisciplinario, en el cual intervienen especialistas en áreas como la ingeniería, el urbanismo, la economía, la ecología y la estadística. Por ejemplo, métodos como el Análisis de Flujos de Materiales (AFM), que se utiliza para medir las entradas y salidas de materiales en un entorno urbano, y la Huella Ecológica, que evalúa el impacto de las ciudades en términos del uso de recursos naturales, son herramientas clave que requieren de datos precisos y actualizados. Asimismo, la modelización del metabolismo urbano, apoyada en tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite integrar múltiples capas de información espacial para un análisis más profundo.

El análisis del metabolismo urbano ha sido aplicado en diversas ciudades alrededor del mundo, proporcionando información valiosa sobre el uso de recursos y la sostenibilidad de los entornos urbanos. Este enfoque permite identificar patrones de consumo, eficiencia energética y generación de residuos, así como evaluar las implicaciones ecológicas y económicas de las actividades urbanas. A través de ejemplos concretos en ciudades, es posible observar cómo el análisis del metabolismo urbano ayuda a los planificadores y responsables políticos a diseñar estrategias para optimizar el uso de recursos, reducir el impacto ambiental y mejorar la calidad de vida urbana. Cada caso resalta los diferentes desafíos y soluciones adaptadas a las características particulares de cada ciudad, demostrando la versatilidad y relevancia de este enfoque en contextos urbanos diversos.

El estudio del metabolismo urbano de las ciudades ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido al aumento de los problemas asociados con el crecimiento urbano desmedido, el cambio climático y la creciente demanda de recursos naturales. Es evidente que para abordar estos desafíos es necesario un enfoque metodológico estandarizado que permita comparar el metabolismo de distintas ciudades, más allá del tradicional indicador per cápita. Esta propuesta busca hacer visibles las dinámicas insostenibles de consumo en un mismo marco de referencia, lo que a su vez facilita el análisis de los impactos socioambientales de las áreas urbanas y sus zonas conurbanas. Para ilustrar este enfoque, se ha seleccionado como caso de estudio la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT), en México.

([Dainiz Noray Montoya García, 2023](#)) realiza un estudio fundamentado en el Análisis de Flujo de Materias y Energía (MEFA), una metodología que permite evaluar las interacciones entre la economía urbana y el entorno natural mediante el seguimiento de los flujos de energía y materiales que entran y salen de las ciudades ([Haberl, 2001](#)).

El enfoque metodológico adoptado incluye la creación de índices metabólicos, a partir del uso del Análisis de Componentes Principales (ACP). Esta técnica estadística permite reducir la dimensionalidad de los datos y resaltar los patrones más significativos que explican las diferencias en el metabolismo urbano de la ZMT entre los años 2000 y 2019. El análisis no solo arroja información sobre los flujos de materiales y energía, sino que también genera un semáforo metabólico que permite identificar los niveles de sostenibilidad o insostenibilidad del área urbana estudiada, con base en criterios como el consumo de recursos naturales, emisiones de CO₂, entre otros. La semaforización, a través del ACP, se presenta como una herramienta innovadora para la toma de decisiones urbanísticas que faciliten la transición hacia modelos de ciudades más sostenibles.

Cabe destacar que el proceso de recopilación de datos para este estudio no estuvo exento de dificultades, especialmente en lo que respecta a la asimetría de la información disponible. Durante el análisis, se identificaron vacíos en las bases de datos oficiales, lo que obligó a realizar ajustes estadísticos para obtener resultados más coherentes y comparables. Por esta razón, se seleccionó un periodo de estudio que abarca de 2000 a 2019, donde se pudo obtener información más consistente y adecuada para la metodología utilizada.

En definitiva, este estudio es una contribución importante para el campo del metabolismo urbano, ya que no solo propone una metodología innovadora, sino que también establece un marco comparativo para evaluar la sostenibilidad de las ciudades. La aplicación del MEFA y el ACP a la ZMT es un ejemplo que puede replicarse en otras ciudades mexicanas y de otros países, siempre y cuando se tengan en cuenta las particularidades locales y se resuelvan las deficiencias en la recolección de datos ([González de Alba, 2020](#)).

Otro de los casos de estudio fue la ciudad de Tandil, Argentina, en el año 2004. La investigación se centró en evaluar esta dinámica de apropiación de recursos externos para la ciudad, utilizando la metodología de la Huella Ecológica (HE), desarrollada por William Rees y Mathis Wackernagel ([Rees, 1996a](#); [Wackernagel, 1996](#)). La HE es un indicador que permite medir cuántas hectáreas de naturaleza son necesarias para satisfacer las demandas de una economía urbana en términos de consumo de recursos y absorción de residuos. Este enfoque metodológico es útil para evaluar

la sostenibilidad de las ciudades, ya que transforma diversos impactos ambientales como el consumo de energía, materiales, y las emisiones de CO₂ en una unidad común de superficie, generalmente expresada en hectáreas.

En este estudio, la ciudad se conceptualiza como un sistema abierto, que funciona a partir de los insumos externos necesarios para satisfacer las demandas básicas de producción y consumo de sus habitantes. Estos insumos incluyen materias primas, alimentos, productos forestales y suelo para urbanización, los cuales provienen, en su mayoría, de ecosistemas externos. A su vez, la ciudad devuelve al medio ambiente desechos y calor disipado, generando un flujo constante entre la ciudad y su entorno natural. Este enfoque del metabolismo urbano permite comprender a las ciudades como sistemas heterotróficos, altamente dependientes de los recursos materiales y energéticos provenientes de fuentes externas, muchas veces localizadas a gran distancia de los centros urbanos ([Rees, 1996b](#)).

Para calcular la HE de Tandil, se seleccionaron los ítems de consumo más relevantes, como alimentos, madera, papel y suelo para urbanización. Posteriormente, se determinó la superficie de ecosistemas productivos requerida para satisfacer estas necesidades. El cálculo de la HE se realizó mediante la siguiente fórmula: $HE_i = C_i / P_i$, donde HE_i es la huella ecológica del ítem, C_i es el consumo del ítem en unidades físicas, y P_i es la productividad o rendimiento de ese ítem en hectáreas ([Rees, 1996a](#)). Asimismo, se calcularon las superficies necesarias para absorber las emisiones de residuos y CO₂, lo que permitió obtener una evaluación completa del impacto ambiental de la ciudad.

Una vez obtenidas las huellas ecológicas parciales y la HE total, es posible comparar la Capacidad de Carga Local (CCL) de Tandil con su demanda de recursos naturales. Esta comparación permite evaluar si la ciudad consume más recursos de los que su entorno local puede sostener, lo cual es fundamental para analizar su sostenibilidad a largo plazo. Además, se calculó la HE per cápita, dividiendo la HE total entre la población de la ciudad, lo que ofrece un indicador directo de la presión que cada habitante ejerce sobre los recursos naturales ([Wackernagel, 1996](#)).

Finalmente, los resultados obtenidos en este estudio permiten no solo evaluar la sostenibilidad de Tandil, sino también ofrecer una herramienta replicable en otros contextos urbanos. La metodología de la HE proporciona una visión integral del impacto ecológico de las ciudades, facilitando la formulación de políticas públicas más informadas que promuevan un uso más eficiente de los recursos naturales.

El caso de estudio de Miramar, un destino turístico de sol y playa, pone de manifiesto la necesidad de reconvertir la industria del turismo hacia un modelo de desarrollo sustentable. La investigación analiza los ciclos de metabolismo urbano de la ciudad, con énfasis en los flujos de aire, agua, residuos y energía, para evaluar su viabilidad como un destino sostenible. El metabolismo urbano se refiere a los intercambios de materia y energía entre una ciudad y su entorno natural, desde la apropiación de recursos hasta la excreción de residuos, lo que permite entender a las ciudades como sistemas vivos en interacción constante con el medio ambiente ([Toledo, 2002](#)).

En Miramar, el estudio de estos ciclos revela una falta de eficiencia en el cierre de los ciclos de materiales. Si bien se han incorporado algunos criterios de sostenibilidad en la gestión urbana, las políticas no se han implementado de manera efectiva, lo que reduce la viabilidad a corto plazo de Miramar para consolidarse como un destino sostenible. No obstante, la implementación de los proyectos en agenda podría mejorar significativamente la situación en el futuro. Este desafío no es exclusivo de Miramar; la mayoría de las ciudades turísticas dependen de insumos externos para su funcionamiento, lo que las convierte en sistemas lineales en lugar de circulares, es decir, no logran regenerar los recursos que consumen ni absorben de manera eficiente los desechos que producen ([Crojethovich Martín, 2004](#)).

La sostenibilidad en destinos turísticos como Miramar depende de la eficiencia en la gestión de los ciclos metabólicos, particularmente en relación con los picos estacionales de demanda que trae consigo la actividad turística. El consumo de agua, energía y la producción de residuos se incrementan drásticamente durante la temporada alta, poniendo a prueba la capacidad instalada de la ciudad para absorber estos impactos sin comprometer su sostenibilidad a largo plazo ([Guerrero, 2008](#)).

El estudio de los ciclos metabólicos de Miramar se realizó utilizando indicadores de referencia, como la Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles del BID (2016), los Informes GEO Ciudades del PNUMA (2008), y el Índice de Ciudades Competitivas y Sustentables de Banamex (2015). Estos indicadores permitieron evaluar el impacto de la actividad turística en el metabolismo urbano a través de temas clave como la producción de residuos sólidos, el acceso a redes de agua potable, el consumo energético, y la contaminación del aire por emisiones de transporte. Además, se tuvo en cuenta el índice de motorización y la superficie de espacios verdes públicos, cruciales para evaluar los impactos de la actividad turística en la calidad del aire y la creación de islas de calor en la ciudad ([Guerrero, 2008](#)).

El análisis reveló que Miramar presenta un balance negativo en términos de apropiación de insumos, ya que la mayoría de los recursos utilizados no se producen dentro de la ciudad, lo que implica una dependencia significativa de ecosistemas externos. Esto refuerza la necesidad de mejorar la gestión ambiental y la planificación urbana para alcanzar un modelo de turismo sostenible y competitivo ([Higueras, 2009](#)). En este sentido, la implementación de políticas que promuevan la eficiencia energética, la reducción de residuos y el uso de energías renovables será fundamental para reducir la huella ecológica del destino y mejorar su competitividad a largo plazo ([Rees, 1996a](#); [Wackernagel, 1996](#)).

En otras palabras, el desempeño ambiental de Miramar en relación con sus ciclos metabólicos determinará su futuro como un destino turístico competitivo y sostenible. Las políticas públicas deben priorizar la sostenibilidad no solo para los residentes, sino también para manejar adecuadamente la afluencia de turistas, maximizando así la productividad y el bienestar de la población local.

Ecuador y América Latina ([Calle, 2016](#)) destacan varias investigaciones recientes sobre la necesidad de políticas públicas robustas que aborden la crisis de residuos de manera sostenible, considerando la separación, tratamiento y disposición final como pilares de una gestión eficaz. El objetivo es resaltar la importancia de la planificación territorial y la sensibilización ambiental para mejorar la gestión de los RSU, asignando una responsabilidad clara a los gobiernos en la promoción de prácticas más sostenibles. El estudio que se analiza se basa en una revisión documental exhaustiva de fuentes científicas y normativas que exploran el sistema integral.

El análisis de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) desde una perspectiva de ecología política revela que la gestión de residuos es un proceso clave en la interacción entre la sociedad y la naturaleza. Según [Solíz \(2017\)](#), los residuos representan el material excretado que no reingresa al sistema metabólico, convirtiéndose en basura o desecho. Este fenómeno está estrechamente vinculado a la creciente necesidad de implementar estrategias de economía circular, que busquen reducir la generación de residuos a través de un enfoque de residuo cero, promoviendo una mayor sostenibilidad en los procesos productivos ([Solíz, 2017](#)).

La generación de RSU está relacionada con el nivel de desarrollo económico y la urbanización. Según datos de la OCDE, los países con economías más desarrolladas generan una mayor proporción de residuos en comparación con otras regiones, lo que evidencia una relación directa entre desarrollo económico y generación de residuos ([Rodríguez-Guerra, 2022](#)). En el contexto de Latinoamérica, la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de residuos orgánicos

representa un desafío significativo, dado que estos constituyen más del 50% de los residuos generados, lo que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y la producción de lixiviados ([López-Vega, 2021](#); [Zafra-Mejía, 2019](#)).

En Latinoamérica, la gestión de residuos orgánicos es un desafío crítico, ya que la ausencia de mecanismos adecuados para su tratamiento genera impactos ambientales como la emisión de gases de efecto invernadero y la acumulación de lixiviados tóxicos en los vertederos. Según [Zafra-Mejía \(2019\)](#), este tipo de residuos representa el mayor volumen de RSU en la región, pero los esfuerzos para su aprovechamiento son limitados. Las investigaciones recientes abogan por la necesidad de inversiones en infraestructuras de tratamiento de residuos, así como la promoción de políticas públicas que fomenten el reciclaje y la valorización de residuos orgánicos ([López-Vega, 2021](#)).

La transición hacia una gestión integral de residuos en Latinoamérica y otras regiones requiere un enfoque combinado de políticas públicas, educación ambiental y tecnologías sostenibles que permitan aprovechar los residuos como recursos. El modelo de economía circular, adoptado por la UE, puede servir como referencia para otros países que buscan mejorar sus prácticas de gestión de RSU, especialmente en regiones donde los residuos orgánicos y la falta de tratamiento adecuado siguen siendo desafíos críticos. La sensibilización de la población y una mayor inversión en infraestructuras de gestión de residuos son aspectos esenciales para alcanzar una gestión más sostenible y resiliente ([Eurostat, 2021](#); [Zafra-Mejía, 2019](#)).

["SISTEMA MUNICIPAL DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD" \(2010\)](#) por otra parte analiza algunos indicadores de sostenibilidad como:

Consumo de agua urbano:

- Definición: Este indicador mide la cantidad total de agua consumida por habitante y día en un municipio, y la cantidad facturada por segmentos de consumo (doméstico, servicios, industrial, agrícola).

- Aspectos de Eficiencia: Se relaciona con la optimización de la demanda doméstica mediante el ahorro en los hogares y la sustitución parcial de agua potable por fuentes no potables como aguas pluviales o subterráneas.

- Fórmula de Cálculo:

1. Consumo total (lpd) = [(agua de la red / población total) / 365 días].

2. Consumo por segmento = $[(\text{consumo facturado} / \text{población total}) / 365 \text{ días}]$.

- Observaciones: Se puede mejorar el análisis con datos sobre pérdidas de agua en la red de distribución.

Depuración de aguas residuales:

- Definición: Este indicador calcula el volumen de aguas residuales urbanas tratadas en estaciones depuradoras u otros sistemas.

- Relevancia: Garantiza la calidad adecuada del agua para su retorno al ciclo y uso posterior, evitando impactos negativos en los ecosistemas.

-Fórmula de Cálculo: $[(\text{volumen de agua tratada} / \text{población total}) / 365 \text{ días}]$.

-Observaciones: Las dificultades surgen cuando las depuradoras atienden a más de un municipio, complicando el cálculo por habitante. Además, es posible que no se logre separar aguas residuales de aguas pluviales.

Reutilización de aguas residuales:

- Definición: Mide el porcentaje de aguas depuradas que son reutilizadas respecto al total tratadas en EDAR municipales.

-Relevancia: Permite la reducción del uso de recursos hídricos y la presión sobre los ecosistemas al reutilizar el agua para usos que no requieren calidad potable, como recarga de acuíferos o usos industriales.

- Fórmula de Cálculo: $[(\text{volumen de agua reutilizada} / \text{volumen de agua depurada}) * 100]$.

-Observaciones: Como en la depuración, las dificultades surgen cuando las EDAR sirven a varios municipios, dificultando la estimación del volumen reutilizado por cada uno.

Consumo final de energía:

- Definición: El indicador mide el consumo final de energía por habitante considerando electricidad, gas natural, gases licuados y combustibles líquidos, así como por sectores de actividad.

- Relevancia: El consumo excesivo de energía afecta negativamente al ambiente y contribuye al cambio climático, lo que hace urgente una gestión más sostenible y el fomento de energías renovables.

- Fórmula de Cálculo:

1. Consumo por tipo de energía = [(consumo anual total / habitantes)].

2. Consumo por sector de actividad = [(consumo anual por sector / habitantes)].

- Observaciones: La dificultad radica en obtener datos precisos sobre combustibles, por lo que se recomienda realizar extrapolaciones basadas en la población.

Producción local de energía renovable:

- Definición: Evalúa la producción de energía renovable en un municipio, expresada en kWh por habitante y año. Las energías renovables incluyen la solar, eólica, hidráulica, geotérmica y biomasa.

- Relevancia: La producción local de energías renovables busca lograr la autosuficiencia energética, reducir la vulnerabilidad ante los suministros centralizados y avanzar hacia un escenario neutro en carbono.

- Fórmula de Cálculo:

1. Producción local total (electricidad y térmica).

2. [(producción local total) / número de habitantes].

- Observaciones: Este indicador refleja la capacidad de autogestión energética municipal, pero no considera el consumo local de energías renovables frente al total.

Generación de residuos sólidos urbanos (RSU):

- Definición: Mide la cantidad total de residuos sólidos generados por habitante y día. Incluye residuos domésticos y otros sectores como comercio, oficinas e instituciones.

- Relevancia: La generación creciente de residuos impacta tanto a nivel local como global, reflejando los hábitos de consumo de la población. El objetivo es reducir la producción y fomentar la reutilización y reciclaje.

- Fórmula de Cálculo:

1. Generación total de residuos = [toneladas de residuos generadas al año].

2. Generación por habitante y día = [(kg de residuos generados / habitantes) / 365 días].

- Observaciones: En municipios con recogida de residuos mancomunada, se debe estimar la cantidad por habitante.

Recogida selectiva neta de residuos:

- Definición: Calcula el porcentaje de residuos segregados en origen y recogidos selectivamente en el municipio respecto a la generación total. Se excluyen los impropios (residuos depositados erróneamente en el sistema de recogida).

- Relevancia: El objetivo de la recogida selectiva es posibilitar el reciclaje y fabricación de nuevos productos, evitando el destino a vertederos o incineración, lo que ahorra energía y materiales.

- Fórmula de Cálculo:

1. Recogida selectiva total = [(fracciones capturadas – impropios) / residuos generados al año].

2. Recogida por fracción = [(fracción capturada – impropios) / residuos generados por fracción].

- Observaciones: El indicador cubre los residuos urbanos y comerciales, y debe incluir el manejo de residuos peligrosos si existen puntos de recogida específicos, como pilas o puntos limpios.

Los indicadores mencionados proporcionan una visión integral del uso de recursos y la gestión sostenible en entornos urbanos. Evaluar estos aspectos es clave para optimizar el consumo de agua y energía, así como la generación y tratamiento de residuos, lo que contribuye a una relación más equilibrada entre la sociedad y el entorno natural. Además, proporcionan una evaluación cuantitativa y cualitativa del uso de los recursos naturales y de la gestión ambiental en las ciudades. Estos indicadores permiten a los gestores municipales y a los responsables de políticas públicas medir, supervisar y mejorar aspectos clave relacionados con el agua, la energía y los residuos, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y la preservación de los ecosistemas.

Los indicadores de sostenibilidad urbana proporcionan una base sólida para que los municipios desarrollen políticas públicas más eficaces en la gestión de los recursos naturales. Además, ayudan a las ciudades a adaptarse a los desafíos globales como el cambio climático y la escasez de recursos, mejorando la calidad de vida de sus habitantes y promoviendo un desarrollo sostenible a largo plazo. A través de una mayor eficiencia en el uso del agua, la energía y la gestión de residuos, las ciudades pueden reducir su impacto ambiental y avanzar hacia un futuro más resiliente y equitativo.

El estudio del metabolismo urbano se sustenta en un enfoque integral que permite evaluar las dinámicas de interacción entre las ciudades y su entorno natural, empleando diversos métodos

como el Análisis de Flujos de Materiales (AFM), la Huella Ecológica (HE), y el Análisis de Flujo de Materias y Energía (MEFA). Estas herramientas, apoyadas en técnicas avanzadas de modelización como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Análisis de Componentes Principales (ACP), brindan una visión detallada de los flujos de energía, recursos y residuos en las zonas urbanas. En el caso de la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT), el análisis metabólico permitió identificar patrones de sostenibilidad mediante un semáforo metabólico, el cual señaló niveles de insostenibilidad en aspectos críticos como el consumo de recursos y las emisiones de CO₂. A través de la aplicación de indicadores como el consumo energético, la generación de residuos sólidos y la huella ecológica, se han evidenciado los desafíos para las ciudades, como Miramar o Tandil, en su transición hacia modelos más sostenibles. En última instancia, la importancia de estos métodos y vías de evaluación radica en su capacidad para generar datos precisos y comparables, fundamentales para el desarrollo de políticas públicas que promuevan la eficiencia en el uso de los recursos naturales y la mitigación de los impactos ambientales, contribuyendo al diseño de ciudades resilientes y sostenibles a largo plazo.

2.3. Propuesta de esquema de análisis para el metabolismo circular de sistemas alimentarios alternativos urbanos.

Los métodos y técnicas en desarrollo para la determinación de los ciclos metabólicos urbanos requieren de bases de datos y estadísticas que resultan de la captación organizada de un conjunto de informaciones relevantes, las cuales demandan de vías confiables y oficialmente establecidas para su utilización.

En Cuba no está formalmente implementada un registro sistemático de información que permita lograr una determinación cuantitativa sobre indicadores clave para el análisis del metabolismo urbano. Elementos tales como la Huella Ecológica y otros factores que permiten una traza segura y confiable para la aplicación de métodos de cálculo, no están establecidos, o en el mejor de los casos, requiere del acopio de datos fragmentados en diversas fuentes, no se manejan públicamente, sino que forman parte de proyectos de seguimiento científico y son casi imposible de disponer en mano.

Es por ello que, en el presente trabajo, se propone la aplicación de esquemas de análisis que, a nivel práctico, permitan una aproximación al conocimiento de los flujos metabólicos en determinados ciclos y constituyan un avance de las formas cualitativas e inexactas con que esto se trata dentro de los problemas de la sostenibilidad de la ciudad. La situación específica del

momento actual, tanto en relación con el suministro y gestión del agua y la energía eléctrica, no brindan una base segura para obtener datos de valor científico.

No obstante, estos esquemas constituyen una vía aproximativa y permiten analizar con un valor evaluativo general, algunos principios del metabolismo urbano y de la economía circular que son de imprescindible examen. También se persigue la posibilidad práctica de implementar estos esquemas de análisis para llegar a determinadas conclusiones respecto a casos de estudio, lo cual puede quedar como experiencias válidas que posteriormente puedan enriquecerse con enfoques y registros de datos más completos.

2.4. Esquema de análisis metabólico del ciclo del agua.

Objetivo del análisis:

- Analizar la relación Entrada/Salida del volumen del líquido que se involucra directamente en los procesos propios del caso.
- Formar criterios para la toma de decisiones que permitan un mejor balance metabólico del agua en el contexto urbano.

Datos de Entrada (INPUT):

a) [V-INPUT] Volumen de agua de entrada (consumida) en los procesos por unidad de tiempo (litros/hora, litros/día o jornada, según el caso): La obtención del dato puede realizarse por medición en un lapso determinado, puede hacerse estimativamente, tanto por observación como por información proveniente de fuentes reconocidas. Si se reutiliza agua de salida en el propio proceso que se analiza, ésta no se tiene en cuenta en la determinación del dato, sino que solamente se contempla como agua de entrada la procedente de fuente externa.

b) Condición del agua de entrada:

- Potable.
- No potable.

Si el agua involucrada en los procesos en análisis es de ambas condiciones, se recomienda lograr el dato o la estimación de sus respectivos volúmenes por unidad de tiempo.

c) Procedencia del agua de entrada:

- De la red urbana (acueducto).

- De otra fuente de servicio público (pozos colectivos, carros cisternas, etc.).
- De fuentes no públicas (pozos particulares y otra procedencia).

Datos de Salida (OUTPUT):

a) [V-REUT] Volumen del agua que es reutilizada: Se considera como reutilizada el agua que sale del proceso y es reincorporada en el mismo. La determinación del dato se hará en opciones similares a las propuestas en el caso de la entrada (input).

- Reutilizada sin tratamiento.
- Reutilizada con tratamiento.

Si una parte del agua reutilizada demanda tratamiento y otra no, la estimación de ambos volúmenes por unidad de tiempo debe registrarse por separado.

b) [V-OUPUT] Volumen de agua de salida (residual o desechada) en los procesos por unidad de tiempo (igual al criterio adoptado para el volumen de entrada): Se considera el agua que sale del proceso en condición residual o de desecho, sin tener en cuenta la reutilizada. La determinación del dato se hará en opciones similares a las propuestas en el caso de la entrada (input).

c) Condición del agua de salida:

- Contaminada (presencia de sustancias diluidas o acompañantes con factor de contaminación).
- No contaminada (inocua).

Si el agua de salida presenta factores de contaminación en una parte de ella, se recomienda lograr el dato o la estimación diferenciada de ambos volúmenes de agua, según su condición, por unidad de tiempo.

d) Destino del agua de salida:

- A las redes e infraestructuras urbanas existentes.
- Al terreno y/o vías de agua o al mar.
- A soluciones o dispositivos específicos de tratamiento.
- Otro (especificar).

Esquema del análisis:

- Eficiencia del ciclo: Puede expresarse en una expresión con interpretación porcentual adimensional, a partir de la relación:

$$[V-OUTPUT] / [V-INPUT]$$

En esta expresión, a medida que su resultado se aproxima más a la unidad (1) el balance metabólico es menos favorable, pues significa que se hace mayor el volumen de agua de salida, lo que también indica que no se logra (o el proceso no lo admite) una reutilización de agua residual.

- Circularidad del proceso: Con igual enfoque que en la eficiencia del ciclo, la expresión a considerar será:

$$[V-REUT] / [V-INPUT]$$

En este caso, la tendencia es diferente que, en la eficiencia, pues el mayor valor del resultado de esta relación evidenciará que el volumen de agua reutilizada o reciclada en el proceso es mayor, aportando a los conceptos de economía circular.

- Impactos en el contexto urbano: Son las consideraciones que pueden hacerse en el caso analizado de factores desfavorables o indeseables del proceso, en cuanto a su ciclo metabólico del agua respecto a:

- Carga del consumo de agua sobre los servicios de abasto urbanos, dado por el requerimiento de potabilidad y la procedencia (acueducto u otras formas de provisión pública del líquido).

- Impacto ambiental y potencial afectación a la salud y vida orgánica (flora y fauna) del agua residual que sea vertida sin tratamiento en terreno y aguas naturales.

2.5. Esquema de análisis metabólico del ciclo de la energía.

Objetivo del análisis:

- Analizar la tendencia de reducción del consumo de energía eléctrica de los procesos en el caso de estudio, respecto a los indicadores en ciclos de consumo anteriores.
- Formar criterios para la toma de decisiones que permitan una mayor racionalidad energética, respecto al contexto urbano.

Datos de análisis:

a) [E-ACTUAL] Situación actual del consumo de energía eléctrica (en kW-h) en los procesos analizados: La obtención del dato se basará en la factura eléctrica del servicio público urbano como fuente de información. Acorde con las características del caso, se determinará la muestra o selección de datos que se empleará como situación actual (puede ser factura del mes anterior, promedio de las facturas del último trimestre u otro acuerdo convencional).

b) Procedencia de la energía eléctrica consumida:

- De la red del servicio público urbano.
- De plantas generadoras propias de tipo convencional.
- De soluciones a partir de fuentes renovables (paneles fotovoltaicos, generador eólico, hidroenergía, etc.)
- De soluciones improvisadas derivadas de la red pública.

Determinar el régimen y aporte de soluciones alternativas al servicio público (plantas, soluciones no renovables) respecto a su funcionamiento permanente o temporal, intermitente, como emergencia ante interrupciones, etc.

c) [E-BASE] Situación de base del consumo de energía eléctrica (en kW-h) en los procesos analizados: En el análisis, según información disponible, se determinará la muestra o selección de datos que se empleará como situación de base (comportamiento del criterio seleccionado para la situación actual respecto a situación anterior, puede ser en meses anteriores, en igual período de año anterior u otro adoptado convencionalmente).

Esquema del análisis:

- Eficiencia del ciclo: Puede expresarse en una expresión adimensional, a partir de la relación:

$[E-BASE] / [E-ACTUAL]$

Mientras mayor sea el resultado de esta expresión el balance entre la situación actual y la situación de base se hará más favorable, como evidencia de que se ha obtenido una tendencia de racionalización. Puede ser que debido a transformaciones tecnológicas o por el escalado de los procesos a niveles superiores, existan factores que justifiquen comportamientos que difieran negativamente del consumo actual respecto a la situación de base, lo cual tendrá un análisis específico en ese caso.

- Circularidad del proceso: Estará condicionado al empleo de soluciones de energía renovable y su empleo más eficiente para reducir el consumo de energía eléctrica tradicional. También procede estudiar los casos de plantas eléctricas que requieran altos consumos de combustibles (diesel).

- Impactos en el contexto urbano: Son las consideraciones que pueden hacerse en el caso analizado de factores desfavorables o indeseables del proceso, respecto a:

- Situaciones irregulares de conexiones improvisadas o incorrectas a la red eléctrica urbana (tendederas u otras).

- Impacto ambiental en emisiones atmosférica de carbono por plantas, contaminación sonora al entorno urbano u otras consecuencias indeseables.

2.6. Esquema de análisis metabólico del ciclo de los residuos sólidos urbanos.

Objetivo del análisis:

- Analizar la tendencia de reducción y reutilización de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados por los procesos del caso de estudio.

- Formar criterios para la toma de decisiones que permitan una mayor racionalidad energética, respecto al contexto urbano.

Datos de análisis:

a) Generación de residuos sólidos en los procesos analizados: Atendiendo a las características de los procesos vinculados con el sistema alimentario urbano, se describirán y registrarán los residuos en, determinando en cada caso su magnitud por unidad de tiempo:

- Orgánicos.

- Inorgánicos.

La cuantificación de los residuos sólidos tiene diversas formas de realizarse (por peso, por volumen, por tamaño, etc.). Atendiendo a las vías reales de la investigación y la carencia de medios, así como falta de estadísticas o registros externos sobre este asunto, la observación de la generación de residuos sólidos en los casos de estudio se hará de manera estimativa y de forma cualitativa pudiendo asociarse a determinados parámetros de tiempo.

Se propone utilizar una escala de magnitud cualitativa por unidad de tiempo. En cuanto a magnitud puede ser: grande, media, reducida. En cuanto a tiempo puede ser por día o por jornada. La clasificación (grande, media, reducida) será apreciativa, integrando el criterio del observador acorde con elementos de juicio que pueden tener en cuenta el volumen de los residuos en relación con su manejo y transportación, en lo cual también influye su condición de peso y dimensiones.

b) Reutilización de los residuos sólidos:

- Se reutilizan en los procesos propios que se desarrollan en el caso de estudio.
- Se aportan a otros destinos que tienen como propósito su reutilización o reciclaje.

Se mantiene el criterio de estimación planteado anteriormente para estos residuos.

c) Generación de residuos para su disposición final (no reutilizados):

- A vertederos o puntos de recolección del servicio público urbano de recogida de desechos sólidos.
- A soluciones propias efectivas para la disposición de residuos (cumpliendo las normas sanitarias, sin afectación o contaminación en suelo, aire ni aguas).
- A otros destinos no formales (basurales, quema, enterramiento, vertimiento informal, etc.)

Se expresará en cada caso la valoración de magnitud acorde con lo señalado en otras partes.

d) Clasificación de los residuos sólidos para su disposición final:

- Se realiza adecuadamente a clasificación según las convenciones establecidas (por ejemplo: metal, vidrio, madera, textiles / orgánicos, inorgánicos / biodegradables, no biodegradables, etc.)
- No se realiza la clasificación de los residuos sólidos.

Esquema del análisis:

- Eficiencia del ciclo: Se determina a partir de la capacidad que demuestra el caso de estudio para un manejo eficiente de los residuos sólidos que genera, en términos de manejo, extracción y salida, cumpliendo con las normativas para este tipo de actividad.
- Circularidad del proceso: En la medida de que se logra la reutilización o reciclaje de los residuos sólidos, tanto en los propios procesos, como en la sistemática salida hacia destinos de reutilización externos al caso.

- Impactos en el contexto urbano:

- Acumulación y manejo incorrecto de los residuos sólidos, que provocan sobrecarga de los servicios urbanos existentes y otros impactos de tipo ambiental, sanitario y estético.

- Violación de regulaciones existentes al efectuar una disposición final de los residuos en lugares y en condiciones inadmisibles para el contexto urbano.

2.7. Conclusiones parciales.

A lo largo de las últimas décadas, la sostenibilidad y la sustentabilidad han emergido como conceptos fundamentales en el desarrollo urbano, reflejando una creciente preocupación por la preservación del medio ambiente y el bienestar social. A pesar de ser utilizados como sinónimos, estas dos nociones representan enfoques diferenciados que afectan la formulación de políticas y prácticas en el ámbito urbano. Mientras que el desarrollo sostenible enfatiza la necesidad de un crecimiento económico compatible con la conservación del medio ambiente, el desarrollo sustentable subraya la importancia de gestionar equitativamente los recursos naturales, asegurando que las generaciones futuras tengan garantizados sus derechos. Esta distinción no solo es teórica; tiene profundas implicaciones prácticas que demandan un enfoque holístico que integre dimensiones económicas, sociales y políticas.

El análisis del metabolismo urbano se presenta como una herramienta clave para entender los flujos de energía, recursos y residuos en las ciudades. Este proceso requiere la integración de múltiples disciplinas, como la ingeniería, el urbanismo, la economía y la ecología, así como la aplicación de metodologías como el Análisis de Flujos de Materiales (AFM) y la Huella Ecológica. Estas herramientas son esenciales para evaluar la sostenibilidad urbana, pues permiten monitorizar cómo las ciudades utilizan y transforman sus insumos. El Análisis de Flujo de Materias y Energía (MEFA) se destaca en este contexto, ofreciendo una evaluación integral de las interacciones entre la economía urbana y el entorno natural. Al seguir los flujos de energía y materiales, se pueden identificar patrones significativos que informan sobre el impacto ambiental y permiten el desarrollo de índices metabólicos.

El caso de estudio de la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) ejemplifica la aplicabilidad de estas metodologías. El análisis realizado entre 2000 y 2019 subraya la relevancia de contar con datos actualizados y precisos, y aunque la asimetría en la información representó un desafío, los resultados obtenidos evidencian la necesidad de evaluar de forma continua la sostenibilidad en contextos urbanos. Este estudio no solo proporciona una perspectiva sobre el uso de recursos

en la ZMT, sino que también contribuye a una comprensión más amplia del metabolismo urbano a nivel global.

La aplicabilidad del análisis del metabolismo urbano se extiende más allá de Toluca, siendo implementada en diversas ciudades a nivel mundial, como Tandil y Miramar en Argentina, y en diferentes contextos de América Latina. Estos estudios han evidenciado que muchas ciudades, a pesar de sus esfuerzos por adoptar modelos sostenibles, siguen siendo dependientes de recursos externos, lo que enfatiza la necesidad de políticas que promuevan la gestión eficiente y la reutilización de recursos. Las experiencias en estas localidades destacan la urgencia de transformar los modelos de desarrollo hacia uno que priorice la sostenibilidad y la resiliencia, en un contexto de creciente crisis ambiental.

En este marco, la evaluación del uso de recursos se puede realizar a través de diversos indicadores que permiten medir aspectos fundamentales de la sostenibilidad, como el consumo de agua, la depuración de aguas residuales, la reutilización de aguas, el consumo energético y la generación de residuos sólidos urbanos. Estos indicadores no solo ofrecen una visión cuantitativa de la sostenibilidad urbana, sino que también contribuyen a una gestión más consciente y estratégica de los recursos. El análisis del metabolismo urbano se erige como un enfoque esencial para el desarrollo de políticas públicas efectivas que promuevan la sostenibilidad en las ciudades. Las metodologías como el MEFA, junto con indicadores de sostenibilidad, proporcionan una base sólida para mejorar la gestión de los recursos naturales y mitigar el impacto del cambio climático. A medida que las ciudades enfrentan desafíos globales, el compromiso con la sostenibilidad se convierte en un imperativo que busca no solo mejorar la calidad de vida de sus habitantes, sino también avanzar hacia un desarrollo urbano más equilibrado y resiliente. En este sentido, es fundamental reconocer que la interconexión entre sostenibilidad y sustentabilidad no solo es relevante para la conservación ambiental, sino también para el bienestar social y la justicia económica en nuestras comunidades urbanas.

CAPÍTULO III. APLICACIÓN DEMOSTRATIVA DEL ESQUEMA DE ANÁLISIS DE LOS CICLOS DE METABOLISMO URBANO CIRCULAR EN CASOS DE ESTUDIO DEL SISTEMA ALIMENTARIO ALTERNATIVO EN CIENFUEGOS

3.1. Desarrollo y resultados de la aplicación demostrativa

3.1.1. Caso 1: Centro de elaboración, Palmira.

Caracterización del centro de elaboración.

El primer caso de estudio que se analizara es un centro de elaboración de productos cárnicos ubicado en el municipio de Palmira, provincia de Cienfuegos en Cuba, y se trata de una planta local dedicada al procesamiento de cárnicos. Este tipo de emprendimiento es fundamental para el sistema alimentario local, ya que forma parte de la cadena de suministro de productos alimenticios que abastecen a la comunidad. La planta está compuesta por dos naves principales, que permiten una eficiente distribución del proceso de producción. El flujo de producción comienza con la recepción de piezas, las cuales pasan por un proceso inicial de despiece, donde se separan las diferentes partes aprovechables del animal. En este punto, algunas piezas se destinan a la elaboración de productos frescos, mientras que otras se procesan más a fondo para obtener picadillo, chorizos y otros productos derivados. Una vez descompuesta la carne, se procede a su molienda y mezcla con especias y otros ingredientes, lo que da lugar a una gran variedad de productos, desde embutidos hasta productos cárnicos curados o semi-procesados. Posteriormente, se da paso al empaquetado y conservación de los productos, muchos de los cuales se congelan para su distribución. Este flujo de trabajo garantiza un aprovechamiento integral de la materia prima, lo que es esencial en un contexto donde los recursos son limitados. Además, al tratarse de un emprendimiento local, contribuye a la economía del municipio, generando empleo y asegurando la disponibilidad de alimentos básicos para la población. Este centro no solo es un actor clave en la producción y transformación de productos cárnicos, sino que está profundamente integrado en el sistema alimentario de Palmira, jugando un papel esencial en la seguridad alimentaria de la región.



Fotos1,2: Fachada del centro de elaboración. Fuente: Tomadas por la autoraa.

El proceso del caso de estudio se basa fundamentalmente en los siguientes aspectos, que conforman la base del análisis metabólico que se hará:

1. Recepción de Materia Prima:

- Inspección y registro de la carne y picadillo.
- Almacenamiento en condiciones adecuadas.

2. Despiece:

- Corte y procesamiento de la carne en diferentes partes.
- Uso de herramientas y superficies de trabajo que requieren limpieza frecuente.

3. Molienda:

- Molienda del picadillo para lograr la consistencia deseada.
- Limpieza de equipos utilizados en este proceso.

4. Mezclado:

- Mezcla de carne con especias, aditivos u otros ingredientes.
- Inspección de la mezcla para asegurar la calidad.

5. Formado:

- Formación de productos cárnicos (embutidos, hamburguesas, etc.).
- Uso de moldes y máquinas que también requieren limpieza.

6. Cocción o tratamiento térmico:

- Cocción de los productos cárnicos si es necesario.
- Limpieza de los equipos de cocción.

7. *Empaque:*

- Envasado de los productos finales.
- Limpieza de las áreas de empaque.

8. *Almacenamiento:*

- Almacenamiento de productos terminados en condiciones controladas.
- Monitoreo de la limpieza en el área de almacenamiento.

9. *Limpieza:*

- Limpieza general del área de trabajo y equipos al final del día.

Aplicación del esquema de análisis metabólico del ciclo del agua.

Datos de Entrada (INPUT):

- a) [V-INPUT] Volumen de agua de entrada (consumida) en los procesos por unidad de tiempo: 500l de agua en una jornada de 8h de trabajo (500/8h); este dato fue estimativo según la experiencia de los operarios.

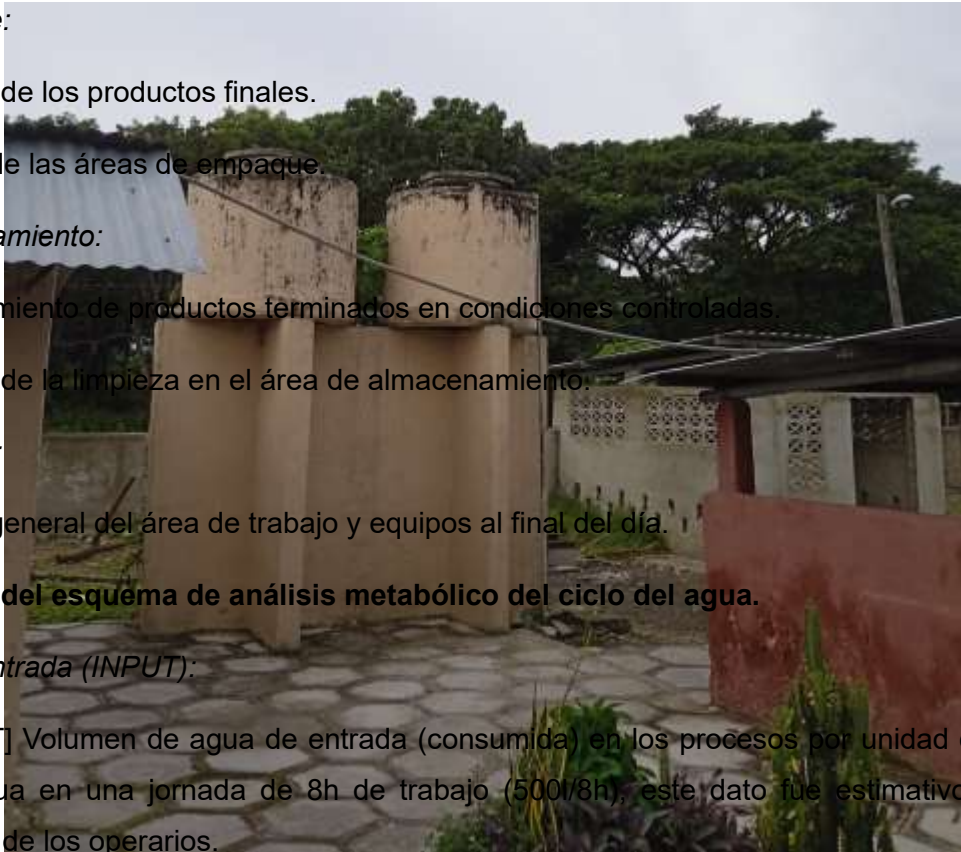


Foto3: Suministro de agua del centro de elaboración. Fuente: Tomada por la autora.

b) La condición del agua de entrada es potable y clorada, que incluso se le toman muestras una vez al mes para evaluar la potabilidad.

c) El agua proviene de un pozo de una fuente no publica que es Combinado Cárnico de Palmira, le suministra agua diaria aproximadamente 12h desde las 5am.

Datos de Salida (OUTPUT):

a) [V-REUT] Volumen del agua que es reutilizada: No se reutiliza agua

b) [V-OUPUT] Volumen de agua de salida (residual o desechada) en los procesos por unidad de tiempo:

Proceso	% Consumo	Litros
Recepción de Materia Prima	10%	50
Despiece	15%	75
Molienda	10%	50
Mezclado	10%	50
Formado	10%	50
Cocción	10%	50
Empaque	10%	50
Limpieza	25%	125

Esta distribución es solo una estimación y puede variar según el tipo de productos que se elaboren, la eficiencia de los equipos utilizados y las prácticas de limpieza aplicadas en el centro.

c) Condición del agua de salida: Contaminada

d) Destino del agua de salida: Al terreno de las zonas posteriores al centro.

Esquema del análisis:

Eficiencia del ciclo y circularidad del proceso:

$[V\text{-OUTPUT}] / [V\text{-INPUT}]$ para calcular la eficiencia

$[500] / [500]$

[1]

Numéricamente el balance es 1, por tanto, la eficiencia metabólica es muy desfavorable pues toda l agua de entrada es consumida en los procesos.

$[V\text{-REUT}] / [V\text{-INPUT}]$ para calcular la circularidad

$[0] / [500]$

[0]

Numéricamente se observa que la circularidad del proceso es nula

El análisis metabólico del centro de elaboración de productos cárnicos, centrado en este flujo de agua, revela un sistema lineal donde toda el agua que entra se consume y se desecha como residual, sin ser reutilizada. Este esquema pone en evidencia una baja eficiencia metabólica y falta de circularidad, ya que no se aprovecha el agua más allá de su primer uso, lo que indica un alto nivel de desperdicio. El agua, al no ser reciclada ni tratada para reutilización, representa un flujo continuo de entrada y salida sin retorno al sistema productivo, lo que incrementa tanto los costos operativos como el impacto ambiental.

Desde la perspectiva de mejora, este esquema destaca la necesidad de incorporar prácticas que fomenten la circularidad del recurso hídrico. Propuestas como la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales permitirían la reutilización de parte del agua en procesos no críticos, como la limpieza inicial de áreas o el enfriamiento de equipos. Asimismo, tecnologías de filtración o sedimentación podrían reducir la carga de contaminantes en el agua residual, haciéndola apta para ciertos usos internos. De esta forma, el esquema metabólico no solo serviría como una herramienta para diagnosticar ineficiencias, sino también para implementar un ciclo de retroalimentación que disminuya la dependencia de agua fresca y maximice el uso eficiente del recurso, alineándose con principios de sostenibilidad y economía circular.

De otra forma para optimizar la circularidad del consumo de agua, es fundamental implementar una serie de estrategias que reduzcan el uso de agua potable y maximicen la reutilización interna. En primer lugar, la captación y almacenamiento de agua de lluvia permitiría su uso en procesos no críticos, como el riego de áreas verdes o la limpieza de superficies externas, reduciendo así la demanda de agua de red. Además, la instalación de sistemas de limpieza automáticos CIP

(Clean-in-Place) optimizaría el consumo de agua y detergentes en los procesos de limpieza, permitiendo también el uso de agua tratada en ciertos ciclos. En las etapas de enjuague, se pueden emplear tecnologías de bajo consumo, como aspersores a presión, que minimizan la cantidad de agua requerida sin comprometer la eficiencia. Finalmente, el agua tratada proveniente de procesos menos críticos puede reutilizarse para tareas como el lavado inicial de equipos y suelos, mientras que el agua reciclada, tras un tratamiento básico, podría emplearse en sistemas de refrigeración y enfriamiento de equipos, donde no es necesario el uso de agua potable. Estas medidas combinadas permiten una reducción significativa del consumo de agua diaria, fomentando un modelo más eficiente y sostenible.

Impactos en el contexto urbano:

El centro de elaboración de alimentos cárnicos depende de un suministro constante de agua potable para garantizar la seguridad alimentaria y cumplir con los estándares sanitarios. Esto genera una carga considerable sobre los sistemas de abasto urbano de agua, especialmente si la región enfrenta restricciones de suministro o si el pozo de suministro tiene capacidad limitada. El consumo diario de 500 litros de agua, principalmente para la limpieza y procesos, incrementa la demanda sobre los servicios del combinado cárnico que suministra el agua, lo que puede resultar insostenible para su desarrollo diario o en caso de alguna afectación atípica. Si se dependiera de otras formas de suministro, como la captación de agua de lluvia o agua de pozos, se tuviera un suministro extra que puede abastecer parte de la demanda de agua, es necesario asegurar que estas fuentes sean tratadas para cumplir con los estándares de potabilidad, lo cual puede ser un desafío si la infraestructura de tratamiento es limitada o ineficaz.

En situaciones de escasez o sequía, este tipo de instalaciones puede entrar en competencia con otros sectores (domiciliario, industrial, agrícola), exacerbando los problemas de abastecimiento urbano. El uso de agua potable en grandes cantidades puede ser ineficiente en algunas etapas del proceso (por ejemplo, en la limpieza de equipos no críticos), lo que podría ser sustituido por alternativas (agua reciclada para ciertos usos no alimentarios). Esto podría aliviar la presión sobre los sistemas de abasto de agua potable si se implementan métodos de reutilización de agua.

El agua residual generada en el centro puede contener altas concentraciones de materia orgánica, grasas animales, sangre y partículas de carne, lo que tiene un impacto negativo si se vierte directamente en cuerpos de agua o suelos sin tratamiento adecuado. Esta carga orgánica puede provocar la eutrofización de cuerpos de agua, lo que promueve el crecimiento excesivo de algas y, a su vez, reduce los niveles de oxígeno en el agua, afectando gravemente la flora y fauna

acuática. Además de la carga orgánica, se pueden liberar productos químicos usados en la limpieza (detergentes, desinfectantes) que pueden tener un impacto tóxico en la fauna acuática y terrestre. Estos productos pueden alterar los ecosistemas acuáticos y perjudicar a organismos sensibles, como peces e invertebrados, además de dañar la flora local. Si las aguas residuales no son tratadas adecuadamente y son vertidas en terrenos o cuerpos de agua cercanos, existe el riesgo de contaminación de fuentes subterráneas o superficiales de agua potable, lo que podría representar un peligro para la salud humana al contaminar el agua consumida por las poblaciones cercanas. El procesamiento de alimentos cárnicos puede generar aguas residuales que contengan patógenos, como bacterias (*Salmonella*, *E. coli*), que podrían dispersarse en cuerpos de agua o suelos sin el debido tratamiento. La presencia de estos patógenos puede representar una amenaza significativa para la salud pública si se propagan a través de fuentes de agua utilizadas para consumo humano, riego agrícola o actividades recreativas.

La descarga incontrolada de aguas residuales puede alterar el equilibrio de los ecosistemas. Los suelos podrían ser dañados si reciben altas cargas de contaminantes, lo que afectaría la vegetación local y, por consiguiente, a las especies animales que dependen de esos ecosistemas. La filtración de aguas contaminadas hacia acuíferos o su vertido directo en ríos o lagos afecta a la biodiversidad, perjudicando especies sensibles y alterando la cadena alimentaria. Los contaminantes vertidos pueden acumularse en los organismos a través de procesos de bioacumulación, afectando no solo a las especies más pequeñas, sino también a los depredadores en la cadena alimenticia, incluidos los seres humanos, que consuman pescado u otros animales afectados por la contaminación.

Implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales que eliminen tanto la carga orgánica como los productos químicos antes de que el agua sea vertida en cuerpos de agua o suelos. Esto puede incluir el uso de plantas de tratamiento biológico, separación de grasas y filtración. Adoptar tecnologías de reciclaje de agua, especialmente para procesos que no requieren agua potable, como la limpieza de pisos o algunos equipos, para reducir la dependencia del suministro urbano. Optimizar el uso de agua a lo largo del proceso productivo mediante la adopción de sistemas de limpieza en seco o de bajo consumo de agua, y la automatización de procesos que permitan un control preciso del agua utilizada.

Esquema de análisis metabólico del ciclo de la energía.

Este esquema se basa en el proceso descrito anteriormente con algunas especificaciones para el caso de la energía y con los equipos en cada proceso.

El centro distribuye el consumo de energía en dos contadores (nevera y horno)

- Consumo de energía del horno: 1844 kWh al mes (100% dedicado al proceso de cocción).
- Consumo de energía de la nevera: 1160 kWh al mes (dedicado a la conservación de materia prima y productos finales).



Foto4: Contadores eléctricos del centro de elaboración. Fuente: Tomada por la autora.

Dado que el horno y la nevera están dedicados específicamente a dos procesos (cocción y almacenamiento), estimaremos el consumo de energía de otros equipos asociados a los demás procesos.

1. Recepción de materia prima:

- Equipos utilizados: Básculas eléctricas para pesar la materia prima, sistemas de iluminación.
- Consumo estimado: Bajo consumo, ya que los equipos son pequeños y de bajo requerimiento eléctrico.
- Consumo estimado: 2% del total diario de la nevera (para iluminación y básculas).
- Consumo diario 1.05 kWh/día.

2. Despiece:

- Equipos utilizados: Sierras eléctricas, cuchillas mecánicas, iluminación.

-Consumo estimado: Equipos medianamente intensivos en energía, como las sierras eléctricas, que funcionan durante parte del turno.

- Consumo estimado: 10% del consumo diario de la nevera.

- Consumo diario: 5.27 kWh/día.

3. Molienda:

- Equipos utilizados: Molinos eléctricos para picar carne.

- Consumo estimado: Los molinos consumen energía moderada y se utilizan en varios ciclos durante la jornada.

- Consumo estimado: 15% del consumo diario de la nevera.

- Consumo diario: 7.91 kWh/día.

4. Mezclado:

- Equipos utilizados: Mezcladoras industriales eléctricas.

- Consumo estimado: Equipos de mezcla son de tamaño medio y operan de manera intermitente durante el turno.

- Consumo estimado: 10% del consumo diario de la nevera.

- Consumo diario: 5.27 kWh/día.

5. Formado:

- Equipos utilizados: Máquinas de formado (por ejemplo, máquinas automáticas o semiautomáticas para formar hamburguesas o embutidos).

- Consumo estimado: Los equipos de formado consumen energía de forma intermitente y no son tan demandantes.

- Consumo estimado: 5% del consumo diario de la nevera.

- Consumo diario: 2.64 kWh/día.

6. Cocción (hornos):

- Equipos utilizados: Hornos industriales que requieren gran cantidad de energía.
- Consumo estimado: 100% del consumo diario del horno.
- Consumo diario: 83.82 kWh/día.



Fotos5,6: Hornos de cocción. Fuente: Tomadas por la autora.

7. Empaque:

- Equipos utilizados: Equipos de envasado, sellado al vacío y etiquetado.
- Consumo estimado: Equipos moderadamente demandantes de energía, usados constantemente durante la jornada.
- Consumo estimado: 10% del consumo diario de la nevera.
- Consumo diario: 5.27 kWh/día.

8. Almacenamiento (neveras):

- Equipos utilizados: Cámaras de refrigeración y congeladores.
- Consumo estimado: 100% del consumo diario de la nevera.
- Consumo diario: 52.73 kWh/día.

Los valores pueden variar en función de la eficiencia de los equipos y la cantidad de productos procesados diariamente.

Aplicación del esquema:

a) [E-ACTUAL] Situación actual del consumo de energía eléctrica (en kW-h):3004kw en un mes, es decir aproximadamente 4,17 kw/h.

b) La procedencia de la energía eléctrica consumida es e la red del servicio público urbano.

c) [E-BASE] Situación de base del consumo de energía eléctrica (en kW-h) en los procesos analizados: Basado en consumo de 6 meses antes se obtiene el dato de 4,30 kw/h

Esquema del análisis:

Eficiencia del ciclo:

[E-BASE] / [E-ACTUAL]

[4,30/4,17]

[1,03]

Numéricamente el resultado no es significativamente mayor, pero si demuestra un elativo ahorro comparado con los últimos 6 meses.

Circularidad del proceso:

El centro de elaboración en cuestión no cuenta con plantas eléctricas ni mecanismos para el uso de energías renovables o de ahorro energético. El hecho de que el centro no utilice actualmente soluciones de energía renovable ni disponga de plantas eléctricas más eficientes sugiere una baja circularidad en el proceso energético. Esto se debe a su total dependencia de fuentes convencionales de energía eléctrica (probablemente provenientes de una red nacional alimentada principalmente por combustibles fósiles). Sería factible implementar un sistema de paneles solares para generar parte de la energía que alimenta los equipos como las cámaras frigoríficas o los hornos, al igual que cambiar las neveras y hornos con mejor aislamiento térmico, que requieran menos energía para mantener temperaturas, o sistemas de programación inteligente que ajusten el uso energético de acuerdo a las horas de producción.

Aunque el centro no cuenta actualmente con una planta eléctrica, analizar este punto puede arrojar luz sobre la eficiencia del proceso en situaciones de emergencia energética (frecuentes en Cuba por fallos en la red eléctrica o cortes de energía). En lugar de depender de plantas eléctricas que funcionen con diesel, sería más efectivo invertir en almacenamiento energético,

como baterías que se carguen a partir de fuentes renovables, o tecnologías híbridas que combinen combustibles fósiles y renovables para una mejor eficiencia.

Esquema de análisis metabólico del ciclo de los residuos sólidos urbanos

a) Generación de residuos sólidos en los procesos analizados:

Recepción de Materia Prima

- Residuos orgánicos: En esta etapa no se generan grandes cantidades de residuos orgánicos, ya que la materia prima es carne cruda lista para su procesamiento.

-Residuos inorgánicos: Se generan residuos como empaques plásticos, papel o cartón utilizados para transportar la carne.

Magnitud:

- Orgánicos: Reducida (poca cantidad de residuos en esta etapa).

- Inorgánicos: Media (principalmente empaques de los contenedores).

Despiece

-Residuos orgánicos: Se generan grandes cantidades de residuos orgánicos, incluyendo huesos, grasa, cartílagos y otras partes no comestibles.

-Residuos inorgánicos: Reducidos, debido a que en esta etapa no se utiliza mucho material inorgánico.

Magnitud:

- Orgánicos: Grande (huesos, grasa y partes no utilizables).

- Inorgánicos: Reducida (casi inexistente).

Molienda

-Residuos orgánicos: Se producen pocos residuos orgánicos, dado que la carne que se somete a molienda es aprovechada en su totalidad.

- Residuos inorgánicos: Pueden generarse residuos derivados de empaques o envases que se descartan en este proceso, aunque es menor en comparación con la recepción.

Magnitud:

- Orgánicos: Reducida (casi nula).

- Inorgánicos: Reducida.

Mezclado

-Residuos orgánicos: Se genera una pequeña cantidad de residuos orgánicos durante el proceso de mezclado, como restos de materia prima que quedan adheridos a las máquinas.

-Residuos inorgánicos: Muy pocos residuos inorgánicos se generan en esta etapa, principalmente envoltorios de aditivos o especias utilizadas en el proceso.

Magnitud:

- Orgánicos: Reducida (restos mínimos en las máquinas).

- Inorgánicos: Reducida.

- Frecuencia: Por jornada.

Formado

-Residuos orgánicos: Pocos residuos orgánicos, pero pueden generarse pequeñas cantidades de sobrantes al formar los productos (sobras de carne o masa que no se utiliza).

-Residuos inorgánicos: Materiales como plástico de envoltorios o bandejas en las que se depositan los productos para formar.

Magnitud:

- Orgánicos: Reducida (sobras mínimas del proceso).

- Inorgánicos: Reducida.

Cocción

-Residuos orgánicos: Este proceso no genera muchos residuos orgánicos, pero se puede dar algún desperdicio relacionado con piezas de carne cocida no aprovechadas o grasas que se extraen.

-Residuos inorgánicos: Podrían generarse algunos residuos inorgánicos relacionados con las bandejas de cocción, aunque es muy reducido.

Magnitud:

- Orgánicos: Media (grasas o restos de carne cocida).

- Inorgánicos: Reducida.

Empaque

- Residuos orgánicos: No se generan residuos orgánicos en este proceso, ya que el empaque no afecta directamente al producto alimenticio.

-Residuos inorgánicos: Esta etapa genera la mayor cantidad de residuos inorgánicos, principalmente plásticos, cajas, envoltorios y otros materiales de empaque.

Magnitud:

- Orgánicos: No aplicable (sin residuos).

- Inorgánicos: Grande (residuos de empaques y envoltorios).

Almacenamiento

- Residuos orgánicos: Pueden generarse residuos orgánicos en caso de que alguna materia prima o producto final se estropee durante el almacenamiento (por caducidad o problemas de refrigeración).

-Residuos inorgánicos: Residuos relacionados con la gestión de inventario y el uso de materiales como etiquetas y plásticos.

Magnitud:

- Orgánicos: Reducida (se generan muy pocos residuos si se gestiona adecuadamente).

- Inorgánicos: Media (etiquetas, plásticos y materiales usados en la refrigeración).

Proceso	Residuos org.	Magtud (orgánicos)	Residuos inorg.	Magtud (inorg.)	Frecuencia
Recepción	Pocos	Reducida	Empaques	Media	Por jornada
Despiece	Huesos, grasa	Grande	Casi ninguno	Reducida	Por jornada
Molienda	Mínimos	Reducida	Algunos empaques	Reducida	Por jornada
Mezclado	Residuos mínimos	Reducida	Envoltorios de aditivos	Reducida	Por jornada
Formado	Sobras de carne	Reducida	Bandejas, plásticos	Reducida	Por jornada
Cocción	Grasas, carne cocida	Media	Bandejas	Reducida	Por jornada

| Empaque | Ninguno | No aplicable | Plásticos, envoltorios | Grande | Por jornada |
| Almacenamiento | Desperdicios | Reducida | Material de refrigeración | Media | Por jornada |

b) Reutilización de los residuos sólidos: Los residuos inorgánicos se reutilizan en su totalidad en los procesos del centro es decir para encender los hornos, por ejemplo.

c) Generación de residuos para su disposición final (no reutilizados): Los residuos orgánicos se trasladan a vertederos en una minoría ya que la mayoría de las veces es usada por los trabajadores para animales u otros destinos.

d) Clasificación de los residuos sólidos para su disposición final: No se realiza la clasificación de los residuos sólidos.

Esquema del análisis:

Eficiencia del ciclo:

El centro genera dos tipos principales de residuos sólidos, residuos orgánicos: principalmente huesos, grasa, cartílagos, restos de carne cocida, y desperdicios que no se utilizan en los productos finales y residuos inorgánicos: principalmente materiales de empaque (plásticos, cajas, envoltorios) y etiquetas de inventario. La magnitud de los residuos es diversa dependiendo de cada etapa del proceso, pero podemos notar que los residuos orgánicos tienen un mayor volumen durante las etapas de despiece y cocción, mientras que los residuos inorgánicos se concentran principalmente en la etapa de empaque.

En el centro, los residuos inorgánicos se reutilizan en su totalidad, lo cual es un aspecto positivo del ciclo metabólico. La reutilización de residuos inorgánicos en los procesos productivos, como el uso de materiales plásticos para encender los hornos, representa una estrategia eficiente para disminuir la dependencia de fuentes externas de energía. Esto reduce la cantidad de desechos que deben ser transportados a vertederos o puntos de disposición final, optimizando así el uso de los recursos disponibles. Sin embargo, el centro no realiza la clasificación de residuos sólidos (ni orgánicos ni inorgánicos) para su disposición final. Esta falta de clasificación implica que no se optimiza el potencial de reciclaje y reutilización de los materiales, lo cual podría mejorar la eficiencia del proceso. Implementar un sistema de clasificación permitiría identificar residuos que podrían tener un segundo uso o podrían ser reciclados, reduciendo aún más el impacto ambiental y mejorando la eficiencia general del ciclo metabólico.

Circularidad del proceso:

Uno de los aspectos clave de la circularidad en este centro es la reutilización de los residuos inorgánicos, en particular los materiales de empaque, como los plásticos. Esta práctica no solo reduce la cantidad de desechos inorgánicos que requieren disposición final, sino que también disminuye la necesidad de fuentes externas de energía, lo que representa un claro ejemplo de cómo los residuos pueden ser reincorporados en el ciclo productivo del mismo proceso. Este tipo de estrategia contribuye de manera significativa a la circularidad, pues aprovecha al máximo los recursos antes de desecharlos. En cambio, los residuos orgánicos generados en las diferentes etapas del proceso, como huesos, grasa y cartílagos, no se reutilizan directamente dentro del ciclo productivo del centro, si bien esto ocurre fuera del ciclo de producción del centro, esta práctica evita que la mayoría de los residuos orgánicos sean simplemente desechados o enviados a vertederos. Esta derivación a destinos de reutilización externos amplía el ciclo de vida de los residuos, disminuyendo la carga de desechos y fortaleciendo la circularidad del sistema de gestión de residuos.

Si bien el sistema ya presenta elementos de circularidad importantes, existen oportunidades claras para mejorar el ciclo de reutilización y reciclaje como la implementación de un sistema de clasificación de residuos. La clasificación adecuada de residuos permitiría identificar de manera más eficiente los materiales que pueden ser reciclados o reutilizados, tanto orgánicos como inorgánicos, mejorando el manejo de los desechos y reduciendo la cantidad que se envía a vertederos. Sería beneficioso explorar la posibilidad de reutilizar los residuos orgánicos directamente dentro del centro, por ejemplo, mediante la implementación de sistemas de compostaje o digestión anaeróbica, que permitan transformar estos residuos en fertilizantes o biogás, generando beneficios adicionales y cerrando aún más el ciclo de recursos dentro del mismo proceso.

Impactos en el contexto urbano:

Uno de los problemas principales que enfrenta el centro es la acumulación de residuos sólidos si estos no se gestionan eficientemente. Aunque en el proceso se reutilizan ciertos residuos inorgánicos y una parte de los residuos orgánicos se destina a usos externos, todavía se genera una cantidad significativa de desechos, especialmente en las etapas de despiece y empaque. Si no se cuenta con un sistema adecuado de recolección y disposición de los residuos que no se reutilizan, existe el riesgo de que se acumulen en el área del centro o en sus alrededores. Esta acumulación podría generar una sobrecarga en los servicios urbanos, especialmente en la capacidad de los sistemas municipales de gestión de residuos. La acumulación prolongada o incorrecta de residuos orgánicos podría, además, atraer plagas y generar malos olores, afectando

la calidad de vida en las áreas cercanas y causando impactos sanitarios importantes, como la proliferación de insectos y roedores, que son vectores de enfermedades.

Otro impacto relevante es la posible violación de normativas urbanas relacionadas con la disposición de residuos. El hecho de que en el centro no se realice una clasificación adecuada de los residuos para su disposición final aumenta el riesgo de que estos se gestionen de manera inadecuada. Aunque parte de los residuos orgánicos se aprovechan externamente, aquellos que se transportan a vertederos sin un control o clasificación adecuada podrían ser depositados en lugares no autorizados, lo que constituye una violación de las regulaciones locales. En este contexto, es vital asegurar que los residuos generados en el centro se manejen conforme a las normas urbanas, lo cual implica la utilización de instalaciones autorizadas para la disposición final y el cumplimiento estricto de las regulaciones que impiden el vertido de desechos en espacios no habilitados. De lo contrario, las sanciones legales a las que se puede enfrentar el centro por incumplir las regulaciones de residuos podrían afectar gravemente sus operaciones.

3.1.2. Caso 2: Combinado Cárnico del municipio de Palmira.

Caracterización del Combinado Cárnico.

El centro se ubica en el municipio de Palmira, en la provincia de Cienfuegos, Cuba, se desarrolla como un centro cárnico de gran envergadura que desempeña un papel fundamental en la economía y abastecimiento local y provincial. Es una instalación donde se realizan diversas etapas del procesamiento de carnes, incluyendo el sacrificio, desposte, procesamiento, almacenamiento y distribución de productos cárnicos de forma general. Dado su impacto en la comunidad y su relación con el entorno, es crucial implementar el esquema metabólico sostenible que se está analizando en cada caso de estudio, enfocado en la eficiencia en el uso de recursos como el agua y la energía, así como en la gestión adecuada de los residuos sólidos generados en el proceso. La infraestructura del centro cárnico abarca varias áreas destinadas a los diferentes pasos del proceso, cada una de las cuales presenta necesidades y demandas específicas de agua y energía. En cuanto al consumo de agua, este centro depende de un sistema de suministro que le permite abastecer sus operaciones diarias, las cuales requieren un alto nivel de limpieza e higiene, tanto en los equipos como en el manejo de los productos cárnicos. En relación con el consumo de energía, este centro cárnico depende de la electricidad y, en menor medida, de combustibles fósiles para las operaciones de maquinaria, iluminación y refrigeración, así como para el funcionamiento de las herramientas de procesamiento. Finalmente, la gestión de residuos sólidos es otro componente crucial en este esquema, ya que las operaciones del

centro generan una considerable cantidad de desechos orgánicos y no orgánicos, incluyendo restos de carne, huesos, grasa y empaques.

Para la aplicación de los esquemas se trabaja con el siguiente proceso fundamental que se organiza en tres etapas principales: el sacrificio de ganado mayor y menor, la obtención de productos cárnicos y subproductos, y la elaboración y comercialización de productos cárnicos y derivados. A continuación, se describen detalladamente cada una de estas etapas:

1. Sacrificio de Ganado Mayor y Menor

Esta primera etapa se centra en el sacrificio de animales, tanto de ganado mayor (por ejemplo, vacuno) como de ganado menor (cerdos, ovejas, cabras). En este proceso se priorizan estándares de seguridad e higiene con el fin de garantizar la calidad de la carne y de los subproductos obtenidos. El proceso comienza con la recepción y evaluación del ganado, donde los animales pasan por controles veterinarios que aseguran que están en condiciones óptimas para el consumo. Posteriormente, se procede al sacrificio humanitario, una práctica regulada para minimizar el sufrimiento del animal, generalmente a través de métodos rápidos e indoloros. Después del sacrificio, se lleva a cabo el desangrado, proceso crucial para la preservación y salubridad de la carne, ya que reduce la proliferación de microorganismos. El siguiente paso es el despiece inicial, en el que los animales son abiertos y eviscerados, separando los órganos internos de la carcasa para ser clasificados. Aquí comienza la separación de subproductos cárnicos como piel, vísceras, sangre y huesos, que serán tratados en la siguiente etapa. La carcasa, tras ser revisada para asegurar la calidad, pasa a la fase de enfriamiento y conservación antes de su procesamiento en productos finales.

2. Obtención de Productos Cárnicos y Subproductos

La segunda etapa del proceso está dedicada a la separación y procesamiento de las partes obtenidas en el sacrificio, convirtiendo cada sección en productos cárnicos específicos y subproductos útiles. En esta fase, el combinado cárnico realiza el desposte y separación de cortes principales, como lomo, costillas y solomillo, los cuales son destinados a la venta directa o para procesos de transformación. Los cortes son seleccionados según su calidad y características, y algunos se clasifican para elaboración de productos procesados (como embutidos y salchichas) o para venta en fresco. Por otra parte, en cuanto a los subproductos, se implementan técnicas de aprovechamiento integral para optimizar los recursos. Las vísceras, por ejemplo, se limpian y preparan para el consumo o para la elaboración de embutidos. La sangre y otros derivados se recolectan para ser utilizados en productos específicos (como morcillas), mientras que las pieles

y huesos pueden ser destinados a la producción de gelatinas, colágenos o fertilizantes orgánicos. Este proceso reduce los desechos y permite la creación de una gama de productos adicionales que maximiza el aprovechamiento del animal.

3. Elaboración y Comercialización de Productos Cárnicos y Derivados

La última etapa es el procesamiento final y la comercialización de los productos cárnicos, donde el combinado se dedica a transformar los cortes y subproductos en productos terminados listos para el consumo y la venta. El proceso de elaboración incluye una variedad de técnicas, como el ahumado, salado, secado y embutido, según el tipo de producto a fabricar. Estos métodos son aplicados en la preparación de embutidos, jamones, tocinos y otros derivados cárnicos. Además, se añaden ingredientes y condimentos para asegurar el sabor y la calidad deseados en cada tipo de producto, conforme a las normativas sanitarias. Para garantizar una larga vida útil, estos productos suelen pasar por procesos de envasado y etiquetado, que permiten mantener las características de frescura y calidad hasta su distribución y venta. Finalmente, el combinado cárnico se encarga de la comercialización de los productos tanto en mercados locales como en establecimientos especializados, abasteciendo a la población de Palmira y sus alrededores. Esta etapa implica también el seguimiento de la calidad posproducción, garantizando que los productos lleguen en óptimas condiciones al consumidor final y cumplan con las expectativas de sabor, textura y seguridad alimentaria.



Fotos7,8: Portada del combinado cárnico. Fuente: Tomadas por la autora

Esquema de análisis metabólico del ciclo del agua:

Datos de entrada:

a) [V-INPUT] Volumen de agua de entrada (consumida) en los procesos por unidad de tiempo: 389,25l/día, este dato se obtuvo de la factura de agua mensual del centro.

b) Condición del agua de entrada: Potable

c) Procedencia del agua de entrada: El centro es abastecido de agua mediante un pozo propio a través de un sistema de bombas sumergibles a 29 metros de profundidad, actualmente la bomba que se encuentra funcionando tiene una capacidad de 16 L/h \approx 58 m³/h la cual consume 33kW/h y trabaja un promedio de 16 horas diarias los días laborales, debido a problemas de salideros y malas prácticas de los operarios lo cual provocaba un excesivo gasto de agua y por ende una pérdida económica. El agua es impulsada por la bomba hasta un tanque elevado a 30 m de altura que cuenta con una capacidad de 200 m³, siguiendo su recorrido por gravedad hasta un metro contador instalado en la entrada de la industria y del cual se alimentan todas las áreas.



Foto9: Pozo. Fuente: Tomada por la autora



Foto10: Metrocontador. Fuente: Tomada por la autora.

Datos de salida:

a) [V-REUT] Volumen del agua que es reutilizada: En el centro no se reutiliza agua.

b) [V-OUPUT] Volumen de agua de salida (residual o desechada) en los procesos por unidad de tiempo: Al no reutilizar agua el volumen de salida es el mismo que se obtiene es decir 389,25l/día

Consumo por área:

Área de corrales: Es donde son recibidos los animales he inspeccionados por veterinarios, en ella los mismos permanecen de 12 – 96 horas antes del sacrificio. Se consume agua para la limpieza de cada establo donde se obtienen volúmenes de efluente considerables, con alta concentración orgánica producto de la presencia del estiércol (32,45L/día).

Área Matanza: El área de matanza incluye el sacrificio de los cerdos y de las reses, además del tratamiento de los subproductos. El consumo de agua durante el sacrificio es necesario e imprescindible, se usa antes, durante y concluido el proceso (236,93L/día).

Área de Deshuese: El área de deshuese es donde se realizan los cortes de las carnes para su posterior utilización, en la misma solo existen 3 llaves que durante la jornada de trabajo permanece aproximadamente abierta todo el tiempo una (la de la mesa de la cierra) y los otros dos alrededores de 2 horas que se utilizan para limpiar luego que se concluye el trabajo (16l/día).

Área de Productos Elaborados Cocidos: El área de productos elaborados cocidos en donde se producen todos los productos comercializados por la ECC como son (embutidos, jamones, jamonadas, chorizos, picadillo, masas, etc.). Esta área incluye los indicadores de producción física de (carne en conserva y masas de croqueta) (46l/día).

Procesos Auxiliares: Refrigeración y producción de vapor(48l/día).

Área de Empresa: El área de la empresa incluye agua para consumo social (cocina comedor y oficinas), la planta de fregado y el taller (7,2l/día).

c) Contaminada

d) Destino del agua de salida: El agua va hacia un sistema residual compuesto por un pretratamiento (rejas y trampas de grasa) encargados de eliminar los sólidos gruesos y finos, y los aceites y grasas; un tratamiento primario (físico) que consiste en un foso de precipitación y la utilización de cribas; y por último un tratamiento secundario (biológico) compuesto por cuatro lagunas de oxidación abiertas; una anaerobia la cual combina la sedimentación de sólidos y su acumulación en el fondo, con la flotación de materiales del agua residual en la superficie y con biomasa activa suspendida en el agua residual o adherida a los lodos sedimentados y a la nata flotante, que realiza un proceso anaerobio a tasa baja donde la materia orgánica es estabilizada

mediante su transformación en dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) principalmente, seguida de tres facultativas las cuales operan en su estrato superior como lagunas aeróbicas, en su estrato inferior como lagunas anaerobias, y en el estrato intermedio con la presencia de bacterias facultativas donde se crea el estrato particular llamada zona facultativa.



Fotos11,12: Foso de precipitación. Fuente: [Zudileynis Cruz Morales \(2018\)](#)



Fotos13,14: Cribas. Fuente: [Zudileynis Cruz Morales \(2018\)](#)



Foto15,16: Lagunas de oxidación. Fuente: [\(Zudileynis Cruz Morales, 2018\)](#)

Esquema del análisis:

Eficiencia del ciclo:

[V-OUTPUT] / [V-INPUT]

[389,25l/día] / [389,25l/día]

[1]

Al evaluar el balance metabólico del agua en el combinado cárnico de Palmira, se analiza que el consumo de agua es muy elevado y está siendo aprovechado de manera ineficiente, lo que genera un balance metabólico desfavorable. En otras palabras, toda el agua que ingresa diariamente se consume por completo, sin opciones claras de reutilización ni prácticas de ahorro, lo cual implica no solo un gasto considerable de recursos hídricos, sino también un impacto ambiental significativo. Para mejorar esta situación y optimizar el uso del agua en todas las etapas del proceso, sería importante implementar medidas de ahorro y reutilización en las áreas que más requieren este recurso. Por ejemplo, en la etapa de sacrificio, el agua utilizada para el lavado de superficies y herramientas podría ser captada y tratada mínimamente, permitiendo su reutilización en procesos no críticos, como la limpieza de áreas externas o para el lavado inicial de algunos equipos menos sensibles. En la fase de obtención de productos cárnicos y subproductos, donde el agua es clave para la limpieza y enfriamiento de los cortes de carne, podrían instalarse sistemas de recirculación de agua enfriada. De este modo, el agua utilizada en el enfriamiento pasaría por un ciclo de recuperación, en lugar de desecharse tras un solo uso. Además, se podría considerar la instalación de boquillas de bajo flujo o sistemas de presión regulada, que aseguren un buen lavado de las áreas de desposte sin derrochar agua. En la etapa de elaboración y comercialización, el agua empleada para la limpieza de espacios de procesamiento y equipos de envasado podría optimizarse con un sistema de control de flujo. Esto permitiría que el agua circule solo cuando realmente sea necesaria y en cantidades adecuadas, evitando que quede corriendo continuamente. Además, sería beneficioso establecer protocolos de limpieza en seco en áreas donde sea factible, reduciendo el uso de agua para tareas de mantenimiento y limpieza de maquinaria y superficies no contaminadas.

Circularidad del proceso:

[V-REUT] / [V-INPUT]

[0] / [389,25l/día]

[0]

La situación actual del centro cárnico en Palmira en cuanto al uso del agua es claramente insostenible. El hecho de que no se reutilice nada de agua en ninguna de las etapas nos deja con un sistema de producción totalmente lineal, sin circularidad alguna. Esto no solo implica un gasto excesivo de un recurso tan valioso, sino que también demuestra una falta de adaptación a las necesidades ambientales y sociales que enfrentamos aquí en Cuba. Este enfoque sin circularidad en el uso del agua está en contraposición a la eficiencia y sostenibilidad que deberíamos estar buscando en un contexto donde el agua no siempre es un recurso garantizado. En estas condiciones, el centro cárnico está dejando escapar una gran oportunidad de operar de manera más responsable y eficiente. La ausencia de un enfoque de reutilización no solo aumenta la dependencia de una gran cantidad de agua diaria, sino que también genera un volumen de aguas residuales que, en un esquema circular, podrían servir para otros usos menos críticos. La realidad es que, mientras otros sectores se esfuerzan por adaptar sus procesos hacia una gestión sostenible, nuestro centro sigue empleando prácticas que no están alineadas con una visión de futuro.

Para que el centro cárnico pueda incorporar circularidad en su balance metabólico de agua, existen varias formas de reutilizar este recurso en diferentes procesos, ajustándose a las condiciones del propio centro y a la infraestructura disponible en Cuba. El agua utilizada para el primer lavado de áreas externas, corrales y suelos puede ser recolectada, filtrada y reutilizada para otras tareas de limpieza menos rigurosas, como la limpieza de pisos de áreas no críticas. Esta agua no necesariamente necesita ser potable, por lo que, con un filtro básico y un sistema de recolección, podría destinarse nuevamente a estas labores, al igual que muchas veces, el agua de refrigeración es descartada luego de cumplir su función. Sin embargo, si se implementan circuitos cerrados para el agua de enfriamiento de equipos, esta podría reutilizarse en el proceso, recirculándola a través de un sistema de enfriamiento o reservorio. Esto evitaría el desperdicio de agua, ya que el mismo volumen podría utilizarse repetidamente con una mínima pérdida. El agua ligeramente usada, o "aguas grises", que se genera en la limpieza de herramientas y zonas que no requieren un alto estándar de desinfección podría emplearse en tareas externas, como el riego de áreas verdes alrededor del centro cárnico o la limpieza de los alrededores. Esto permitiría que esta agua tuviera un ciclo de uso adicional antes de desecharse. De otra forma las aguas residuales del proceso pueden someterse a una filtración o un tratamiento simple para remover residuos sólidos y materiales contaminantes, y luego redirigirse para tareas que no demanden agua potable, como el lavado inicial de camiones o la limpieza de áreas exteriores. Este filtrado

básico podría lograrse con tecnologías de bajo costo, como filtros de arena o carbón activado, adaptables al contexto cubano. Dado que las condiciones de agua en Cuba pueden ser variables, la captación de agua de lluvia podría contribuir a reducir el consumo de agua potable en el centro. Esta agua podría usarse para el lavado de suelos, limpieza de exteriores e incluso para mezclar con otras aguas tratadas para el riego de áreas verdes, proporcionando una fuente adicional que alivie la demanda de los suministros locales.

Impactos en el contexto urbano:

En el contexto urbano, el centro cárnico enfrenta desafíos importantes, especialmente en relación con el consumo y manejo del agua, que afectan no solo a la eficiencia interna del centro, sino también a la comunidad y al medio ambiente circundante. A pesar de que el centro dispone de su propio pozo para el abastecimiento, su alto nivel de consumo de agua implica una presión considerable sobre los recursos hídricos subterráneos, que son limitados. Al no incorporar medidas de reutilización o circularidad en su esquema metabólico de agua, el centro aumenta su dependencia de una extracción constante de este recurso.

El hecho de que el centro mantenga un modelo de uso lineal, es decir, que el agua ingresa, se utiliza en cada etapa y luego se desecha, implica no solo una dependencia mayor de extracción continua, sino también la ausencia de prácticas que permitan un uso más racional del recurso hídrico. Esto es especialmente relevante dado que cualquier crisis de agua que afecte a la operación del pozo del centro, o en momentos de sequía, podría incluso impactar indirectamente en la comunidad, ya que otros consumidores, como pobladores, servicios de salud o agrícolas, también dependen de la misma reserva subterránea en la región. Así, el gasto elevado de agua dentro del centro, sin buscar la manera de reutilizar parte del volumen en procesos secundarios, agrava la carga sobre el suministro y compromete la sustentabilidad hídrica local. En cuanto a las aguas residuales, es favorable que el centro disponga de un tratamiento antes de verterlas en el entorno. El sistema de tratamiento, que incluye pretratamiento, tratamiento primario y secundario mediante lagunas de oxidación, reduce en gran medida el riesgo de contaminación directa en el medio ambiente. Sin embargo, el volumen de aguas residuales generado, aunque tratado, sigue siendo un factor importante en la carga urbana y ambiental. Cualquier variación en la efectividad del tratamiento o un fallo en el sistema podría comprometer la calidad de los cuerpos de agua circundantes y generar afectaciones a la flora, fauna y eventualmente a la salud de la población local si el agua no llega a cumplir los parámetros necesarios de calidad. A largo plazo, este esquema actual, donde el centro sigue extrayendo grandes cantidades de agua y desechando toda el agua utilizada, genera una huella hídrica que tiene repercusiones en la sostenibilidad del

recurso en el contexto urbano. Implementar medidas para reducir el consumo de agua en cada etapa o para reutilizar el agua en algunas operaciones internas no solo aliviaría la presión sobre los recursos subterráneos, sino que también reduciría la carga energética del sistema de bombeo, optimizando el uso de agua dentro del centro.

Esquema de análisis metabólico del ciclo de la energía:

a) [E-ACTUAL] Situación actual del consumo de energía eléctrica (en kW-h) en los procesos analizados: 76788 KW/h mensual, este dato se tomó de la factura eléctrica del mes de septiembre del 2024.

b) Procedencia de la energía eléctrica consumida: De la red del servicio público urbano.

El centro cuenta con un grupo electrógeno para cado de alguna falla o emergencia.

c) [E-BASE] Situación de base del consumo de energía eléctrica (en kW-h) en los procesos analizados:76302kw/h en el mes e junio y 92119kw/h en el mes de julio, ambos datos tomados de la factura eléctrica.

Consumo de energía en los procesos.

Proceso	Consumo Estimado (kWh)	Porcentaje
Refrigeración	30,715 kWh	40%
Bombeo de Agua	15,358 kWh	20%
Maquinaria de Procesamiento	11,518 kWh	15%
Elaboración de Productos Cocidos	7,679 kWh	10%
Iluminación General	5,385 kWh	7%
Oficinas y Áreas Administrativas	3,070 kWh	4%
Procesos Auxiliares	3,063 kWh	4%
Total Aproximado	76,788 kWh	100%

Tabla1: Consumo d energía por cada proceso(septiembre). Fuente: Elaboración propia.

Esquema del análisis:

Eficiencia del ciclo:

[E-BASE] / [E-ACTUAL]

[76302kw/h] / [76788kw/h]

[0,99]

Al analizar la eficiencia del ciclo metabólico vinculado al consumo eléctrico del combinado cárnico, se observó un incremento moderado en el consumo de energía entre los meses de junio y septiembre. Si bien el aumento no es dramático, es un indicador relevante de que existen oportunidades de optimización en el uso de la energía en cada una de las etapas del proceso. Este incremento sugiere que, a pesar de que las operaciones mantienen una cierta estabilidad, es posible que ciertos equipos, prácticas o condiciones estén generando un gasto mayor de lo necesario. Factores como un mantenimiento irregular de los equipos de refrigeración, el uso constante de bombas de agua, y un manejo de maquinaria sin optimización podrían estar contribuyendo a este aumento.

Para reducir el consumo y mejorar la eficiencia en el ciclo metabólico del centro cárnico, la refrigeración representa una de las áreas de mayor consumo energético entonces revisar y programar el mantenimiento de los equipos de refrigeración puede reducir el gasto, asegurando que operen en condiciones óptimas, así como implementar un sistema de monitoreo de temperatura y horarios controlados de enfriamiento, para evitar la operación innecesaria, ayudará a mantener la temperatura adecuada sin sobrecargar el sistema. También el bombeo de agua es fundamental, pero representa un alto costo energético. Para reducir su consumo, se podrían instalar bombas con variadores de frecuencia, los cuales ajustan la potencia en función de la demanda, optimizando su operación. Es recomendable revisar regularmente el sistema de tuberías para detectar y reparar fugas, que no solo incrementan el consumo de agua sino también el gasto energético al demandar más horas de bombeo. En las etapas de procesamiento (despiece, deshuese, cocción), se puede establecer turnos de uso de maquinaria y evitar operar en simultáneos equipos de alto consumo reducirá los picos de energía, mejorando la eficiencia y la implementación de procedimientos de apagado automático en equipos cuando no están en uso también ayudaría a reducir el consumo innecesario de energía.

Circularidad del proceso:

La circularidad del proceso en nuestro ciclo metabólico vinculado al consumo eléctrico es un punto crítico, especialmente si buscamos eficiencia y sostenibilidad en el centro cárnico. Actualmente, la energía eléctrica consumida proviene de la red pública urbana, con un respaldo en forma de un grupo electrógeno para emergencias. Sin embargo, el análisis de consumo entre los meses de junio y septiembre (de 76,302 kWh a 76,788 kWh) muestra una eficiencia del ciclo

metabólico ligeramente baja, con un índice de 0,99, señalando un aumento moderado en el consumo. Este incremento, aunque pequeño, nos indica que hay margen para mejorar y hacer más eficiente el uso de la energía. Para avanzar hacia un modelo más circular y reducir la dependencia de la energía eléctrica convencional, una alternativa clave sería integrar fuentes de energía renovable. La instalación de paneles solares, por ejemplo, podría proporcionar una fuente constante y reducir los picos de consumo. También, es fundamental evaluar el uso del grupo electrógeno, ya que este genera un alto consumo de diésel en situaciones de emergencia, impactando directamente en el costo y en las emisiones de carbono. Una solución sería considerar opciones híbridas o renovables como respaldo, de modo que solo se recurra al diésel cuando sea absolutamente necesario. Además, dado que la refrigeración es una de las áreas de mayor consumo energético, asegurar el mantenimiento constante de estos equipos no solo ayudará a mantener la estabilidad del sistema, sino que optimizará su rendimiento. La instalación de sistemas de monitoreo para mantener temperaturas dentro del rango requerido sin sobrecargar los compresores sería una medida eficiente para reducir la demanda eléctrica sin comprometer la calidad del proceso.

Impactos en el contexto urbano:

Desde el contexto urbano, el funcionamiento del centro cárnico presenta ciertos desafíos que, aunque enfocados en la producción y eficiencia interna, también tienen un impacto directo sobre el entorno. Es crucial considerar los factores desfavorables asociados al uso y gestión de la energía eléctrica y su relación con el contexto urbano, ya que cualquier situación irregular, como conexiones improvisadas o incorrectas (por ejemplo, tendederas o extensiones fuera de norma), no solo representa un riesgo de seguridad, sino que puede sobrecargar la red pública y generar inestabilidad en el suministro eléctrico del área. Para el centro, esto supone una vulnerabilidad y podría afectar la confiabilidad de la operación. Además, el impacto ambiental y sonoro es un aspecto que no puede ignorarse. El centro utiliza un grupo electrógeno como respaldo en caso de cortes de energía, lo cual es una medida de seguridad efectiva para la continuidad operativa; sin embargo, su funcionamiento se basa en combustibles fósiles (diésel), lo que implica emisiones atmosféricas de carbono que afectan la calidad del aire en la zona. Esto tiene implicaciones directas en el entorno urbano, ya que genera emisiones que contribuyen al cambio climático y a la contaminación local. Por otro lado, el uso del generador y el funcionamiento de la maquinaria pesada dentro del centro producen ruido que, aunque controlado, puede causar molestias al vecindario, sobre todo en horarios de alta actividad o emergencias. Este ruido es una externalidad negativa que, con una gestión adecuada, podría reducirse mediante el uso de barreras acústicas

o la instalación de sistemas de insonorización en áreas específicas, minimizando el impacto en el entorno. Considerando estos aspectos, es fundamental que el centro cárnico implemente soluciones que apunten no solo a la eficiencia energética interna, sino a la sostenibilidad en relación con la comunidad. Alternativas como fuentes de energía renovable reducirían la dependencia de la red urbana y de los generadores de diésel, disminuyendo tanto las emisiones como el ruido. Además, mantener y revisar las conexiones eléctricas regulares con la red pública, cumpliendo las normativas vigentes, reforzaría la seguridad y evitaría riesgos tanto para el centro como para la infraestructura urbana.

Esquema de análisis metabólico del ciclo de los residuos sólidos urbanos

Datos de análisis:

Generación de residuos sólidos en los procesos analizados y reutilización y destino de dichos residuos:

La clasificación realizada evidencia la necesidad de contar con protocolos de gestión específicos y diferenciados según el tipo de residuo, atendiendo a la magnitud y frecuencia de generación. Los residuos de magnitud grande, como los que se envían al vertedero, representan un desafío tanto en almacenamiento como en transportación, debido a sus características de peso y volumen, siendo importante optimizar el manejo de estos para minimizar su impacto en el contexto urbano. Los residuos destinados al consumo animal y a la Biofam muestran una estrategia de valorización de subproductos que, aunque en menor magnitud, contribuye a reducir el volumen de desechos enviados al vertedero, promoviendo una economía circular. Por último, los residuos inorgánicos reciclables representan una alternativa de aprovechamiento de recursos materiales, aunque su generación y manejo deben ser monitoreados para asegurar que se realice de manera eficaz y sostenible. Esta clasificación y disposición del manejo de residuos es un paso hacia la mejora del ciclo metabólico de residuos en el centro, con la posibilidad de optimizar las prácticas de separación y reutilización en cada etapa del proceso productivo para reducir el impacto ambiental en el contexto urbano.

Generación de residuos para su disposición final (no reutilizados): De manera general todos los residuos se reutilizan, contribuyendo a un ciclo de aprovechamiento integral, aunque en muchos casos fuera del mismo proceso de origen. Los huesos, pezuñas y cuernos que se envían al vertedero finalmente sirven como abono, integrándose de nuevo al ciclo de nutrientes del suelo. Las vísceras y pulmones se destinan al consumo animal, regresando al ciclo productivo en los animales que serán sacrificados en el futuro. La sangre es enviada para la elaboración de

medicamentos, y el cebo generado se emplea en la producción de jabón dentro del mismo centro, aportando a la cadena de valor. Además, los materiales inorgánicos, como cartones y plásticos, se destinan como materia prima para otros procesos industriales. Para incrementar aún más la reutilización interna de estos residuos, el centro podría considerar la incorporación de tecnología de compostaje o biodigestores que aprovechen subproductos orgánicos para generar fertilizantes o biogás dentro de las instalaciones. Asimismo, el desarrollo de un sistema de procesamiento interno para convertir residuos como huesos y vísceras en harinas de carne para alimento animal podría maximizar el uso de estos subproductos, contribuyendo aún más a la sostenibilidad y circularidad del proceso en el mismo ciclo productivo del centro.

Tipo de Residuo	Composición	Magnitud	Frecuencia	Cantidad (estimada)	Destino
Orgánicos - Vertedero	Huesos, cuernos, pezuñas	Grande	Anual	2,000 t/año	Vertedero
Orgánicos - Consumo animal	Hígado, pulmones, restos animales	Media	Mensual	2-3 t/mes	Consumo animal
Orgánicos - Sangre	Sangre	Reducida	Mensual	1-2 t/mes	Biofam
Inorgánicos - Reciclables	Cartón, plásticos	Media	Periódica	Variable según producción	Materia Prima

Tabla2: Cantidad de residuos sólidos. Fuente: Elaboración propia.

d) Clasificación de los residuos sólidos para su disposición final: Como tal no se realiza la clasificación de los residuos sólidos.



Fotos17,18: Residuos para alimentación animal. Fuente: Tomadas por la autora.

Esquema del análisis:

Eficiencia del ciclo:

La eficiencia en la gestión de residuos sólidos del centro cárnico revela una estrategia de aprovechamiento sostenible de subproductos, cumpliendo con normativas y estableciendo un ciclo que promueve la economía circular. A pesar de que la disposición actual permite reducir el volumen de desechos enviados al vertedero, en ausencia de un sistema de clasificación diferenciado se limitan tanto las oportunidades de optimización en el manejo interno como la identificación precisa de volúmenes y tipos de residuos. Esto restringe la capacidad de alcanzar un ciclo metabólico más completo y eficaz en términos ambientales y económicos.

Actualmente, todos los residuos tienen algún destino de aprovechamiento o reutilización, lo cual es un logro significativo para reducir el impacto ambiental en el contexto urbano. Los residuos orgánicos, como vísceras y pulmones, regresan al ciclo productivo a través del consumo animal, integrando nutrientes en los animales que eventualmente serán sacrificados. La sangre destinada a la elaboración de medicamentos y el cebo empleado en la producción de jabón dentro del propio centro representan otros ejemplos de esta estrategia de valorización. Los residuos inorgánicos reciclables, como cartón y plástico, se destinan a materias primas para otros procesos industriales. Sin embargo, al carecer de una clasificación detallada de los residuos sólidos, es más difícil maximizar el aprovechamiento interno y promover un ciclo que retorne aún más subproductos hacia el propio proceso productivo del centro. Implementar un protocolo de clasificación de residuos sólidos en términos de tipo y magnitud sería clave para una gestión aún más eficiente. Una segmentación clara entre residuos orgánicos y reciclables permitiría evaluar su potencial de reutilización directa o indirecta y abriría la posibilidad de implementar prácticas de compostaje o el uso de biodigestores en las instalaciones. Por ejemplo, la incorporación de un biodigestor no solo trataría los residuos orgánicos de gran volumen, sino que también podría generar biogás como fuente alternativa de energía para las propias operaciones del centro. Asimismo, establecer una infraestructura para convertir residuos, como huesos y vísceras, en harinas de carne para alimento animal impulsaría aún más la sostenibilidad y circularidad del proceso.

A través de estas mejoras, la eficiencia del ciclo metabólico del centro se vería potenciada en cada etapa, consolidando su compromiso con la reducción de desechos y promoviendo una mayor autosuficiencia dentro del ciclo productivo. La gestión optimizada de residuos sólidos permitiría también reducir costos de almacenamiento y transporte y minimizar el impacto

ambiental en la zona urbana circundante, ya que, al disminuir los envíos al vertedero, se aliviaría la presión sobre los recursos municipales. Esta mejora no solo sería beneficiosa desde el punto de vista económico, sino que contribuiría a una imagen más sostenible del centro en la comunidad urbana, alineándose con los principios de una economía circular y de sostenibilidad a largo plazo.

Circularidad del proceso:

En el centro cárnico se muestra una clara intención de reincorporar los residuos sólidos generados en nuevos ciclos de uso, logrando así una gestión más integral y sostenible. En la práctica, muchos de los desechos se destinan a aplicaciones externas. Este enfoque reduce el volumen de residuos que requiere disposición final en vertederos, permitiendo que, en cada salida, se establezca un aporte funcional en otros sectores. Sin embargo, el potencial de circularidad podría mejorar si se lograra integrar una mayor proporción de los subproductos de vuelta al mismo proceso productivo del centro. El cebo utilizado en la producción de jabón dentro del centro representa un buen ejemplo de circularidad interna, ya que convierte un subproducto en un bien que se reintegra a la cadena de valor interna. La creación de productos derivados, como harinas de carne para alimentación animal a partir de huesos y vísceras, sería otro paso importante que no solo aprovecharía mejor estos recursos, sino que reduciría la dependencia de productos externos. En conjunto, estos pasos permitirían una reintegración continua de los subproductos generados, mejorando la circularidad del centro y disminuyendo su huella ambiental al optimizar el ciclo metabólico de los residuos.

Impactos en el contexto urbano:

El manejo de los residuos sólidos generados en el centro cárnico presenta desafíos importantes que, de no gestionarse adecuadamente, pueden repercutir negativamente en el entorno local. La acumulación y disposición incorrecta de estos residuos sobrecarga los servicios urbanos, como la recolección y tratamiento de desechos, lo que además de demandar recursos adicionales, puede generar condiciones insalubres que afectan la calidad de vida en áreas circundantes. Los residuos orgánicos que, por sus características, son susceptibles de descomposición rápida, pueden contribuir a la proliferación de vectores de enfermedades si no se aseguran prácticas de almacenamiento y transporte eficientes. Asimismo, la disposición de ciertos subproductos en vertederos, como huesos y pezuñas, puede conllevar un impacto ambiental y visual que agrava la problemática de los sitios de disposición final urbanos. Esta acumulación incrementa el riesgo de emisiones atmosféricas indeseadas, malos olores y potenciales efectos sobre el suelo y aguas subterráneas, particularmente si se exceden las capacidades de los vertederos municipales o si

no se cumplen las normativas locales para el manejo de residuos industriales. Además, las normativas urbanas de disposición final imponen estándares estrictos que requieren que el centro cárnico ajuste su gestión de desechos a prácticas adecuadas para evitar sanciones y contribuir positivamente al ambiente urbano. La optimización en la gestión de estos residuos no solo reduciría la presión sobre la infraestructura urbana, sino que ayudaría a mantener un equilibrio ambiental en la zona, previniendo problemas sanitarios y estéticos que repercuten en toda la comunidad. Enfocar esfuerzos en protocolos de manejo que aseguren la disposición regulada y controlada de los residuos y considerar soluciones que minimicen la necesidad de traslado a vertederos puede ser un aporte significativo para reducir la huella del centro en el contexto urbano.

3.1.3. Caso 3: Emprendimiento local (panadería “Villar”).

Caracterización de la panadería.

La panadería que se caracteriza se ubica en el municipio de Palmira en la provincia de Cienfuegos. La panadería se presenta como un emprendimiento innovador en Cuba que combina la producción tradicional de pan con un enfoque sostenible, utilizando la yuca como ingrediente agrícola clave. Este producto local, de bajo costo y fácil acceso, se incorpora en la elaboración del pan, sustituyendo parcialmente la harina de trigo, lo que no solo fomenta la soberanía alimentaria, sino que también reduce la dependencia de insumos importados. La panadería opera bajo un esquema metabólico diseñado para optimizar el consumo de recursos y evaluar su eficiencia. El agua se utiliza en diversas etapas del proceso, desde la preparación de la masa hasta la limpieza, mientras que la electricidad es fundamental para el funcionamiento de equipos como amasadoras y hornos. Los residuos orgánicos, como cáscaras y restos de yuca, son gestionados de manera sostenible, transformándolos en compost o insumos para otras industrias. Este enfoque permite no solo valorar la circularidad del proceso, sino también identificar oportunidades para la implementación de tecnologías más limpias y eficientes, promoviendo así un modelo de negocio que equilibra productividad con responsabilidad ambiental.

El proceso que se analiza tiene varios microprocesos claves:

1. Recepción y Preparación de Materias Primas

La panadería recibe los insumos principales como harina de trigo, agua, levadura y sal, suministrados por el Estado. Estos ingredientes son almacenados en condiciones controladas para garantizar su calidad.

2. Pesado y Mezclado

Los ingredientes son pesados según recetas estandarizadas. Luego, se mezclan en este caso de forma manual, donde se forma la masa.

3. Fermentación

La masa se deja reposar en cámaras de fermentación, donde se controla la temperatura y humedad para permitir que la levadura actúe, generando el volumen y textura característicos del pan.

4. División y Moldeado

Tras la fermentación, la masa es dividida en porciones y moldeada en diversas formas dependiendo del tipo de pan a producir (barras, panecillos, etc.).

5. Horneado

Las piezas moldeadas se colocan en bandejas y se hornean en hornos industriales a altas temperaturas. Este es uno de los procesos más intensivos en consumo de energía.

6. Enfriamiento y Empaque

Después de horneado, el pan se enfría antes de ser empacado y distribuido a puntos de venta o directamente al público.

7. Distribución

Una vez empacado, el pan es enviado a tiendas, bodegas y otros puntos de distribución estatal, donde se vende a precios regulados.

Aplicación del esquema de análisis del Agua:

Datos de Entrada (INPUT):

- a) [V-INPUT]: 2050l cada dos días, es decir 2050l/24h laborables, cada día se trabaja aproximadamente 12 horas.
- b) Condición del agua de entrada: Potable
- c) Procedencia del agua de entrada: El agua proviene de fuentes no públicas, en este caso pipas abastecen el consumo de la panadería.



Fotos 19, 20, 21: Suministro de agua de la panadería. Fuente: Tomadas por la autora.

Detalle por proceso:

Preparación y Mezcla (150 L/día): Este proceso requiere agua para la hidratación de la masa y la limpieza de los recipientes de mezcla.

Fermentación (100 L/día): Aquí se incluye el agua utilizada en el ambiente controlado para mantener la humedad y limpieza de las cámaras de fermentación.

Horneado (50 L/día): Principalmente para la limpieza de las bandejas y superficies relacionadas con el horneado.

Enfriamiento (100 L/día): Se necesita agua para procesos de enfriamiento en hornos o sistemas asociados.

Limpieza de Equipos (200 L/día): Equipos como amasadoras y bandejas necesitan limpieza constante para mantener la calidad del producto y evitar contaminación.

Limpieza General (100 L/día): Incluye la limpieza del área de trabajo, pisos y utensilios auxiliares.

Proceso	Consumo de Agua (litros por día)	Porcentaje del Consumo Total
Preparación y Mezcla	150	21.4%
Fermentación	100	14.3%
Horneado	50	7.1%
Enfriamiento	100	14.3%
Limpieza de Equipos	200	28.6%
Limpieza General	100	14.3%
Total	700	100%

Tabla3: Consumo de agua por proceso. Fuente: Elaboración propia.

Datos de Salida (OUTPUT):

- a) [V-REUT]: 0, no se reutiliza agua en ningún momento del proceso.
- b) [V-OUTPUT]: 700l/12h, por lo que se consume desde el suministro de una pipa a que vuelva la otra (2 días) aproximadamente 1400l.
- c) Condición del agua de salida: Contaminada.
- d) Destino del agua de salida: A las redes de infraestructura urbana existentes.

Esquema del análisis:

Eficiencia del ciclo:

$$[V-OUTPUT] / [V-INPUT]$$

$$[1400l/24h] / [2050l/24h]$$

$$[0,68]$$

El análisis del ciclo metabólico de la panadería, a partir de la fracción de 0,68 entre el agua de salida y la de entrada, sugiere que existe un desbalance significativo en el manejo de este recurso. Este valor indica que el 68% del agua utilizada en el proceso se convierte en agua residual o no reaprovechada, un escenario que se aleja de la eficiencia ideal en un sistema sostenible. En términos prácticos, este resultado refleja que la panadería no optimiza la reutilización del agua, ya sea por limitaciones tecnológicas del proceso o por falta de sistemas

adecuados para el tratamiento y recirculación. Cuando la fracción se acerca más a 1, como es el caso, significa que la mayor parte del agua termina siendo desechada tras un único uso, lo que implica un alto volumen de desechos líquidos que deben ser tratados o eliminados. Esto puede generar no solo un mayor costo operativo por el tratamiento del agua residual, sino también un impacto ambiental considerable, especialmente en un contexto donde el acceso a agua potable puede ser limitado. Desde una perspectiva metabólica, un balance eficiente debería buscar minimizar este valor, maximizando la reutilización del agua en varias etapas del proceso, como en la limpieza de equipos, la fermentación, e incluso en sistemas de enfriamiento.

Circularidad del proceso:

[V-REUT] / [V-INPUT]

[0] / [2050l/24h]

[0]

El balance metabólico realizado muestra que la panadería no reutiliza ninguna cantidad de agua, ya que el cociente entre el agua reutilizada y la de entrada es igual a cero. Este resultado revela una ausencia total de circularidad en el proceso, lo que contraviene los principios fundamentales de la economía circular, que buscan maximizar la reutilización de recursos para reducir el impacto ambiental y optimizar la eficiencia operativa. La falta de reutilización de agua es un indicativo de que el sistema está funcionando bajo un modelo lineal, donde los recursos son utilizados una vez y luego desechados, generando mayores volúmenes de residuos líquidos. Este enfoque no solo incrementa la demanda de agua nueva, ejerciendo presión sobre las fuentes locales, sino que también implica un costo ambiental y económico significativo en el tratamiento y disposición de las aguas residuales. En un contexto donde la sostenibilidad y la gestión eficiente de los recursos son prioridades, este resultado evidencia un área crítica de mejora. La implementación de tecnologías o prácticas que faciliten la reutilización del agua podría transformar radicalmente esta situación. Por ejemplo, la instalación de sistemas de filtrado y tratamiento podría permitir que el agua utilizada en la limpieza o en procesos no sensibles sea recirculada. De igual forma, se podrían explorar soluciones innovadoras como la captura y reutilización de agua condensada en procesos de enfriamiento o cocción.

Impactos en el contexto urbano:

El impacto del ciclo metabólico del agua en esta panadería, genera varias consideraciones negativas dentro del contexto urbano. Un primer aspecto crítico es la carga que el consumo de

agua ejerce sobre los servicios de abasto urbanos. A pesar de que el agua utilizada proviene de pipas, sigue siendo parte del suministro público que, en términos de logística, añade presión a las infraestructuras locales. La necesidad de potabilidad del agua implica un proceso de extracción, tratamiento y distribución que requiere recursos significativos. Este proceso, al no estar vinculado a una red de abastecimiento directamente en la panadería, refleja una vulnerabilidad en la continuidad y eficiencia del suministro, especialmente en situaciones de escasez o sequía.

Un segundo aspecto relevante es el impacto ambiental de las aguas residuales vertidas sin tratamiento adecuado. Al descargarse en redes urbanas o directamente en terrenos y cuerpos de agua, las aguas residuales contaminadas pueden contener restos orgánicos y otros agentes perjudiciales, lo que provoca la degradación de la calidad del agua y el suelo en el entorno. Esto no solo afecta la salud de la flora y fauna locales, sino que también representa un riesgo para la salud pública, al fomentar la proliferación de bacterias y enfermedades transmitidas por el agua. En un contexto urbano, estas prácticas pueden comprometer ecosistemas acuáticos cercanos y agravar problemas como la eutrofización de lagunas y ríos.

Estos efectos subrayan la importancia de integrar sistemas de tratamiento y reutilización de agua. La falta de circularidad, evidenciada por la inexistencia de reutilización, no solo intensifica la dependencia de fuentes externas, sino que también incrementa el volumen de residuos contaminantes que deben ser gestionados por la infraestructura urbana. Esto pone de manifiesto la necesidad urgente de soluciones sostenibles que mejoren la gestión del agua, tanto para mitigar el impacto ambiental como para aligerar la carga sobre los servicios urbanos de abasto y saneamiento.

Aplicación del esquema para la Energía:

Datos de análisis:

a) [E-ACTUAL] Situación actual del consumo de energía eléctrica (en kW-h) en los procesos analizados: 200kw/ en una jornada laboral, que aproximadamente son 12h cada jornada en dependencia de la producción.

b) Procedencia de la energía eléctrica consumida: De la red del servicio público urbano y de un grupo electroenergético en el caso que la red no ofrece servicio. La panadería no cuenta con soluciones renovables, pero cuenta con un grupo electroenergético que respalda su buen funcionamiento para no desperdiciar la producción.

c) [E-BASE] Situación de base del consumo de energía eléctrica (en kW-h) en los procesos analizados: 170kw/ en una jornada de trabajo. Este dato es tomado de la factura eléctrica de hace 6 meses.



Fotos22,23: Contadores eléctricos de la panadería. Fuente: Tomadas por la autora.



Foto24: Grupo electroenergético. Fuente: Tomada por la autora.

Esquema del análisis:

Eficiencia del ciclo:

[E-BASE] / [E-ACTUAL]

[170kw/12h] / [200/12h]

[0,85]

Con base en el cociente numérico de 0.68, se puede interpretar que, comparando los valores actuales con los de hace 6 meses, ha habido una disminución en la eficiencia del ciclo metabólico en la panadería. Según el criterio mencionado, un valor inferior a 1 implica que la situación actual es menos favorable con respecto a meses anteriores. Esto sugiere que se han incrementado los recursos o energía utilizados para obtener un mismo nivel de producción, o que la producción ha disminuido con respecto a los recursos consumidos. Si ha habido cambios en el equipamiento o métodos de producción, podrían estar impactando negativamente en la eficiencia si no se han optimizado completamente. Por otra parte, el desgaste de equipos, maquinaria desactualizada o mantenimiento inadecuado podría aumentar el consumo de recursos sin una mejora proporcional en la producción. En un contexto como el de Cuba, también la escasez de insumos de calidad o el acceso irregular a la energía pueden ser factores que justifiquen la disminución de la eficiencia.

Algunas operaciones que se pueden implementar para mejorar esta eficiencia es capacitar al personal en el uso eficiente de recursos y en la operación de equipos para reducir desperdicios, asegurar un mejor manejo de insumos y procesos, reduciendo el consumo innecesario de energía o materiales. Se puede pensar en la creación de un programa riguroso de mantenimiento preventivo para evitar pérdidas de eficiencia debido al deterioro de equipos y reparar y actualizar maquinaria crítica con repuestos accesibles o de fabricación local. También es viable, considerar tecnologías de bajo costo, como paneles solares para ciertos procesos (como iluminación o calefacción de hornos), así como, identificar oportunidades para reutilizar insumos (harina, agua) en otros subprocesos sin comprometer la calidad.

Circularidad del proceso:

La circularidad en los procesos productivos se refiere a la capacidad de un sistema para minimizar desperdicios y maximizar la reutilización de recursos, incluyendo el uso eficiente y sostenible de la energía. En el caso de esta panadería a analizar, la situación energética presenta retos específicos que afectan la circularidad, dado que la inestabilidad y los apagones frecuentes dificultan la continuidad del proceso productivo, generando un consumo irregular de energía. Si

bien el grupo electrógeno funciona como respaldo, pero implica un alto consumo de diésel, un recurso no renovable y contaminante. Este tipo de solución reduce la dependencia de la red eléctrica, pero incrementa la huella de carbono y reduce la circularidad del sistema. La falta de tecnologías como paneles solares, biodigestores o generadores eólicos limita la transición hacia una mayor circularidad, ya que el proceso sigue dependiendo de fuentes de energía tradicional (electricidad de la red y diésel).

Se recomienda, aunque la inversión inicial puede ser elevada, implementar energías renovables, esta tecnología podría cubrir parte del consumo eléctrico durante el día, reduciendo la dependencia tanto de la red como del grupo electrógeno; un caso puede ser microturbinas eólicas, si la ubicación geográfica cuenta con buenos vientos, estas podrían complementar el uso de energía renovable. También usar **biocombustibles** en lugar de diésel, si están disponibles, como alternativa menos contaminante, ayudaría a minimizar el consumo de petróleo. De igual manera se puede incorporar baterías para almacenar la energía generada por el grupo electrógeno durante apagones o de fuentes renovables si se implementan.

En otras palabras, la panadería opera actualmente con un modelo energético que, aunque funcional en condiciones de recursos limitados, limita la circularidad y la sostenibilidad del proceso. La incorporación de energías renovables y la optimización del uso de recursos no renovables son pasos esenciales para mejorar la circularidad en el contexto cubano. A mediano y largo plazo, estas medidas no solo reducirán costos operativos, sino que también contribuirán a la sostenibilidad ambiental.

Impactos en el contexto urbano:

En el análisis del impacto urbano, es crucial considerar cómo las operaciones de la panadería afectan al entorno inmediato. Dado que está ubicada en un barrio y depende de la red pública de energía eléctrica, se generan una serie de impactos desfavorables tanto en el ámbito técnico como ambiental. Si la panadería está conectada mediante sistemas informales o subóptimos, se aumenta la probabilidad de sobrecargas, afectando la estabilidad de la red eléctrica en el barrio. Las conexiones improvisadas incrementan el riesgo de incidentes eléctricos, lo que puede provocar cortes de energía y dañar otros dispositivos en las viviendas cercanas, en mayores daños puede causar accidentes eléctricos, poniendo en peligro tanto a la panadería como a la comunidad. Desde el punto de vista ambiental se puede generar contaminación acústica con el grupo electroenergético y puede causar molestias a los vecinos, por niveles significativos de ruido en momentos de apagón y horarios incómodos, pues la panadería labora de madrugada.

Para mejorar estos inconvenientes se puede asegurar que la panadería cuente con una conexión eléctrica formal y segura, evitando el uso de tendederas o sistemas improvisados, además incorporar dispositivos de protección (como estabilizadores de voltaje) para minimizar el impacto de la carga sobre la red y evitar daños a otros usuarios. Con respecto a la contaminación sonora, utilizar tecnologías de reducción de emisiones (filtros catalíticos) y sistemas de aislamiento acústico disminuye el ruido durante su operación y si es posible, emplear combustibles más limpios que reduzcan la huella de carbono.

Aplicación del esquema para Desechos sólidos:

Datos de análisis:

a) Generación de residuos sólidos en los procesos analizados:

En total y aproximadamente se desecha medio saco de basura, en dependencia de la producción.

b) Reutilización de los residuos sólidos: No hay reutilización

c) Generación de residuos para su disposición final (no reutilizados): A los puntos de recolección del servicio público, los cuales traslada el camión de la basura.

d) Clasificación de los residuos sólidos para su disposición final: No se realiza la clasificación.



Foto25: Cantidad de desechos solidos de varios días. Fuente: Tomada por la autora.

Tipo de Residuos	Composición	Magnitud	Frecuencia
Orgánicos			
- Harina en polvo	Restos generados durante la mezcla y amasado	Media	Diaria
- Migajas de pan	Sobras del corte y manipulación del pan	Media	Diaria
- Cáscaras de yuca	Residuo del uso de yuca como insumo agrícola	Media	Diaria
- Restos de masa	Exceso o desecho de la preparación	Reducida	Diaria
- Pan no apto para venta	Productos defectuosos o sobrantes	Reducida	Diaria
Inorgánicos			
- Envases plásticos	Recipientes de ingredientes o insumos	Reducida	Diaria
- Papeles y cartón	Embalaje de materias primas	Media	Diaria
- Descartes de bandejas o utensilios dañados	Materiales deteriorados durante el proceso	Reducida	Semanal

Tabla4: Consumo de residuos por proceso. Fuente: Elaboración propia.

Esquema del análisis

Eficiencia del ciclo y circularidad del proceso:

El análisis del manejo de residuos sólidos evidencia una baja eficiencia metabólica y circularidad nula, lo que implica que los desechos no se reutilizan ni se clasifican. Este sistema lineal genera impactos negativos tanto en el entorno urbano como en la sostenibilidad del proceso. La panadería genera medio saco de residuos sólidos diarios, compuestos principalmente de cáscaras de yuca, harina en polvo, migajas de pan y desechos inorgánicos (plásticos y cartón). Estos son dispuestos sin clasificación en puntos de recolección pública, cumpliendo con las normativas mínimas, pero sin un enfoque de valorización o reutilización. Entre las deficiencias esta la dependencia del sistema público de recolección de basura que incrementa la presión sobre los servicios urbanos, que en muchos casos ya son insuficientes, el desaprovechamiento de residuos orgánicos, los cuales podrían ser utilizados en compostaje o alimentación animal y por último la disposición final sin separación contribuye a la saturación de vertederos y a la contaminación ambiental.

El proceso no presenta ninguna forma de circularidad, ya que no se implementan prácticas de reutilización ni reciclaje de los residuos. Esto es un reflejo de una economía lineal, donde los recursos son extraídos, utilizados y desechados sin retorno al sistema productivo. Dado el contexto de un país en vías de desarrollo como Cuba, es fundamental proponer soluciones de bajo costo, fácil implementación y con resultados sostenibles. Se puede comenzar por implementar un sistema básico de separación de residuos, clasificándolos en orgánicos, orgánicos reciclables y orgánicos no reciclables; esto podría realizarse utilizando cubos o sacos diferenciados que permitan una gestión más eficiente en la recolección y disposición. De otra manera se pueden destinar los residuos orgánicos a compostaje, que luego podría ser usado como fertilizante en la agricultura local. Este sistema no requiere tecnología avanzada, solo espacios y formación básica. Los residuos como cáscaras de yuca y migajas de pan podrían ser canalizados hacia granjas locales para la alimentación de animales. Con ciertos cambios o aprovechamiento de los residuos se disminuyen los costos de disposición, disminuye la contaminación y mejora la calidad del suelo a través del compostaje, se minimiza la extracción de nuevos recursos y se promueve la reutilización.

Impactos en el contexto urbano:

La gestión inadecuada de los residuos sólidos generados tiene un impacto negativo en el contexto urbano, contribuyendo a la sobrecarga de los servicios públicos de recolección. La acumulación de medio saco diario de desechos, compuesto mayormente por residuos orgánicos e inorgánicos sin clasificar, ejerce presión adicional sobre un sistema ya limitado. Esto incrementa la frecuencia y costos de la recolección, generando puntos de acumulación que afectan tanto la operación como la calidad del entorno. Este manejo deficiente promueve la contaminación del suelo y aguas subterráneas debido a la descomposición no controlada de residuos, como cáscaras de yuca y restos de harina, que liberan lixiviados y gases contaminantes. Además, la proliferación de vectores como ratas e insectos supone un riesgo sanitario significativo para la comunidad.

El impacto ambiental se combina con consecuencias estéticas y sociales. La acumulación visible de residuos en áreas urbanas degrada la imagen del municipio, desvalorizando espacios públicos y afectando la calidad de vida. Esto repercute en sectores como el comercio local, donde un entorno limpio es crucial. A su vez, la disposición final de residuos en condiciones que no cumplen normativas expone a la panadería a sanciones legales, evidenciando una desconexión entre la gestión de la empresa y las regulaciones locales. Para mitigar estos impactos, es esencial implementar soluciones sostenibles como puntos de compostaje comunitario y recolección

selectiva, acompañados de campañas de sensibilización, mejorando así la relación entre la panadería y su entorno urbano.

3.2. Conclusiones parciales

El análisis de los ciclos de metabolismo urbano circular aplicada a los tres casos de estudio en Palmira ha permitido evaluar de manera más precisa la interacción entre los flujos de agua, energía y desechos sólidos dentro de los sistemas de producción alimentaria. A través de la implementación de este esquema metabólico, fue posible identificar los principales factores que inciden en la eficiencia y la circularidad de los procesos productivos en cada uno de los casos seleccionados: un centro de elaboración de alimentos, un combinado cárnico y una panadería. Cada uno de estos sistemas presenta características particulares que influyen en el comportamiento de los flujos de recursos y desechos, y que, a su vez, determinan sus niveles de sostenibilidad.

En el caso del centro de elaboración en Palmira, se observó una dependencia considerable de fuentes externas de agua y energía, lo cual incrementa la vulnerabilidad del proceso ante posibles fluctuaciones en la disponibilidad de estos recursos. A pesar de que el ciclo de desechos sólidos mostró algunas iniciativas de manejo y reciclaje, las oportunidades de mejorar la eficiencia del sistema se centran principalmente en la optimización del uso de agua y la integración de fuentes de energía renovable. La implementación de tecnologías de bajo consumo y sistemas de recirculación de agua podrían contribuir significativamente a la mejora de la circularidad del sistema, reduciendo tanto el impacto ambiental como los costos operativos.

Por otro lado, el combinado cárnico presentó un alto consumo de agua en las fases de procesamiento y limpieza, lo cual subraya la necesidad urgente de repensar la gestión del recurso hídrico dentro del ciclo productivo. La eficiencia en el uso de la energía, aunque adecuada en ciertos procesos, podría ser optimizada mediante la integración de soluciones más eficientes y la mejora en los sistemas de gestión de residuos orgánicos, que en muchos casos son subutilizados. La adopción de prácticas de reutilización de agua y la incorporación de energías limpias y renovables, como la solar o la biomasa proveniente de los desechos orgánicos, podrían aumentar la circularidad del sistema, minimizando el consumo de recursos no renovables y la generación de desechos.

La panadería en Palmira, aunque presenta un modelo de producción más sencillo, también mostró áreas claras de mejora en términos de consumo energético y generación de residuos. Asimismo, la generación de desechos sólidos, especialmente en forma de empaques y residuos

orgánicos, plantea desafíos adicionales que podrían abordarse a través de la implementación de sistemas de compostaje y la mejora en la eficiencia de los procesos de distribución. De manera general, la panadería tiene un gran potencial para reducir su huella ecológica mediante la adopción de prácticas circulares como la reducción del desperdicio de alimentos y la incorporación de tecnologías más limpias en su operación.

En términos generales, los tres casos de estudio revelan que, aunque existen esfuerzos por optimizar los recursos dentro de los procesos productivos, aún subsisten importantes deficiencias en la gestión de los ciclos de agua, energía y desechos sólidos. Es evidente que la transición hacia un modelo de metabolismo urbano circular más eficiente requiere de un enfoque integrado que contemple no solo la mejora de la eficiencia operativa de cada proceso, sino también la implementación de políticas públicas que fomenten la reutilización y el reciclaje, así como la adopción de tecnologías más limpias. De esta forma, se lograría no solo mejorar la eficiencia de los sistemas productivos, sino también reducir su impacto ambiental, contribuyendo a una mayor sostenibilidad del sistema alimentario alternativo en la ciudad de Cienfuegos. En resumen, la aplicación del esquema de análisis de ciclos de metabolismo urbano circular ha permitido identificar los principales puntos críticos y oportunidades de mejora en cada uno de los sistemas de producción alimentaria estudiados. Si bien es necesario profundizar en el análisis de las interacciones entre los diferentes flujos de recursos y desechos, los resultados obtenidos destacan la importancia de integrar soluciones tecnológicas innovadoras y sostenibles para avanzar hacia un modelo de producción más circular y eficiente. El fortalecimiento de la circularidad en estos sistemas será clave para promover un desarrollo urbano más resiliente y sostenible, con un menor impacto ambiental y un uso más eficiente de los recursos disponibles.

CONCLUSIONES GENERALES.

En el trabajo se propuso un esquema de análisis de los emprendimientos alimentarios alternativos a partir del metabolismo urbano, con el fin de evaluar la sostenibilidad de estos sistemas dentro del contexto urbano y, de ser posible, optimizar sus procesos para que sean más eficientes y respetuosos con el medio ambiente; y se ha logrado este propósito, contribuyendo a una nueva visión sobre cómo los sistemas alimentarios urbanos alternativos pueden alinearse mejor con los principios de la economía circular y el metabolismo urbano, elementos clave para el desarrollo sostenible en las ciudades.

Una de las principales conclusiones es que los sistemas alimentarios alternativos en las ciudades no deben entenderse como procesos aislados de la urbe, sino como partes integradas de un ecosistema más amplio. Para que estos sistemas sean verdaderamente sostenibles, deben estar

en armonía con los principios del metabolismo urbano, que promueve una gestión eficiente de los recursos disponibles (agua, energía y desechos), evitando la sobreexplotación de los mismos y reduciendo al mínimo el impacto ambiental. Así, esta tesis ha demostrado que es posible desarrollar modelos de producción de alimentos alternativos dentro de los límites urbanos que respeten estos principios, utilizando los recursos disponibles de manera más eficiente, minimizando el desperdicio y, en la medida de lo posible, cerrando los ciclos de agua, energía y desechos. De igual forma un enfoque centrado en los principios del metabolismo urbano y la economía circular permite realizar una evaluación más integral y detallada de los emprendimientos alimentarios urbanos. En cada uno de los casos de estudio, fue posible identificar áreas de mejora en la eficiencia de los recursos y en la circularidad de los procesos, lo que evidencia que la incorporación de estos criterios proporciona un marco más adecuado para la toma de decisiones sobre la gestión de los sistemas alimentarios urbanos.

La aplicación del esquema de análisis de los ciclos de agua, energía y desechos a los casos de estudio seleccionados (el centro de elaboración, el combinado cárnico y la panadería en Palmira) ha revelado cómo se pueden optimizar los flujos de estos recursos dentro de un sistema alimentario alternativo. En cada uno de estos casos, aunque ya existían prácticas de gestión de recursos, se identificaron oportunidades significativas para mejorar la circularidad, reducir el consumo de recursos externos (especialmente agua y energía) y minimizar los desechos generados. La integración de soluciones como el reciclaje de agua, el uso de energías renovables y la reutilización de los desechos orgánicos puede transformar estos sistemas en modelos más eficientes y resilientes, contribuyendo no solo a la sostenibilidad de los emprendimientos alimentarios, sino también a la del entorno urbano en el que se insertan.

Otro aspecto importante que se ha destacado en esta investigación es que el desarrollo de un sistema agroalimentario urbano alternativo no puede concebirse sin considerar los desafíos y limitaciones propios del entorno urbano. La producción de alimentos debe ir más allá de la simple obtención de productos, sin tener en cuenta los costos ambientales, sociales y económicos que puede generar un modelo de producción no sostenible. Por tanto, es fundamental que cualquier estrategia de desarrollo del sistema alimentario urbano se diseñe de manera que respete y se alinee con los principios del desarrollo sostenible, evitando soluciones que exacerben problemas como la escasez de recursos naturales, la generación de residuos y la degradación del entorno urbano. Esto implica un enfoque más holístico y estratégico, que contemple no solo las necesidades inmediatas de producción de alimentos, sino también las implicaciones a largo plazo para la ciudad en su conjunto.

A través de la metodología empleada, se evidencia que es posible pensar en un sistema alimentario urbano alternativo que cumpla con los requisitos de sostenibilidad urbana mediante la aplicación del concepto de metabolismo urbano. Esto no significa que el proceso de producción de alimentos deba realizarse "a cualquier costo", sino que debe orientarse a cerrar los ciclos de consumo y producción dentro del marco de los límites ecológicos urbanos. Así, las estrategias deben enfocarse en la eficiencia en el uso de recursos y la implementación de modelos de negocio que favorezcan la circularidad y reduzcan la dependencia de recursos externos. La propuesta de utilizar los tres ciclos de agua, energía y desechos como base para evaluar la eficiencia de estos sistemas es una herramienta clave que puede aplicarse no solo en los emprendimientos alimentarios analizados, sino también en otros sectores urbanos que busquen mejorar su sostenibilidad.

En conclusión, se ha aportado una propuesta sólida y respaldada por evidencia empírica para pensar el desarrollo de los sistemas alimentarios urbanos en función de su sostenibilidad, utilizando el enfoque del metabolismo urbano como herramienta central. El análisis de los ciclos de agua, energía y desechos en los emprendimientos alimentarios alternativos ha permitido identificar áreas de mejora y oportunidades para cerrar los ciclos de recursos en la ciudad, optimizando tanto la eficiencia de los procesos como el uso de los recursos disponibles. El cumplimiento del objetivo general de la tesis y la validación de la hipótesis planteada confirman que la integración de los principios del metabolismo urbano y la economía circular es clave para el desarrollo de sistemas alimentarios urbanos más sostenibles y resilientes, que no solo contribuyan a la seguridad alimentaria, sino también a la preservación de los recursos y la mejora de la calidad de vida en las ciudades.

RECOMENDACIONES FINALES.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se pueden delinear varias recomendaciones que abordan tanto el futuro de las investigaciones relacionadas con el metabolismo urbano aplicado a los sistemas alimentarios alternativos, como posibles áreas de exploración en otros campos y sugerencias para la aplicabilidad práctica del esquema propuesto. Se ofrece una base sólida para que futuras investigaciones profundicen en el esquema de análisis propuesto, pero es necesario ampliar la muestra de casos de estudio para obtener resultados más representativos y generalizables. Los tres casos de estudio seleccionados (un centro de elaboración de alimentos, un combinado cárnico y una panadería) brindan una visión parcial del sistema alimentario alternativo en Cienfuegos. Ampliar la muestra con otros tipos de emprendimientos alimentarios, como mercados urbanos, huertos urbanos o iniciativas de

agricultura vertical, permitiría evaluar una gama más amplia de prácticas y procesos productivos, ofreciendo una perspectiva más completa sobre la eficiencia y circularidad de los recursos en estos sistemas. Se recomienda intervenir no solo en los ciclos de agua, energía y desechos, sino también en otros ciclos del balance metabólico urbano, como el insumo de recursos materiales (por ejemplo, materias primas y envases), que son cruciales para entender la totalidad del impacto ambiental de los sistemas alimentarios urbanos. La investigación de estos otros flujos permitirá una evaluación más integral y exhaustiva de la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios urbanos y ofrecerá nuevas oportunidades de mejora en términos de eficiencia de recursos y reducción de residuos.

Este trabajo, aunque centrado en el ámbito de los sistemas alimentarios alternativos y su relación con el metabolismo urbano, puede servir de base para investigaciones en otros campos que también aborden la sostenibilidad urbana. Un área particularmente relevante es la logística urbana, donde el concepto de metabolismo urbano puede aplicarse para estudiar la eficiencia de los flujos de mercancías, transporte de alimentos, distribución y residuos. Los principios de economía circular y metabolismo urbano pueden ayudar a diseñar sistemas logísticos más sostenibles, reduciendo el consumo de energía, el impacto del transporte urbano y los desechos generados en la cadena de suministro alimentario. Asimismo, este enfoque podría extenderse a otras áreas como la gestión de residuos urbanos y la planificación territorial. Investigaciones que exploren cómo integrar el concepto de metabolismo urbano en el diseño de infraestructuras y políticas públicas podrían contribuir a la creación de ciudades más sostenibles y resilientes, no solo en términos de la producción de alimentos, sino en una visión más amplia que contemple la gestión de los recursos naturales y la reducción del impacto ambiental en general. La implementación de modelos circulares y el análisis de ciclos urbanos en diferentes sectores permitiría encontrar sinergias que mejoren la sostenibilidad del entorno urbano.

En cuanto a la aplicabilidad práctica del esquema de análisis propuesto, es fundamental que las autoridades locales y las personas encargadas de la organización territorial, así como aquellas que trabajan en la gestión de recursos energéticos y ambientales, consideren la implementación del esquema en sus políticas y estrategias. Es posible que, mediante la incorporación de los principios del metabolismo urbano y la economía circular, se logren diseñar sistemas más eficientes en términos de gestión de los recursos urbanos, no solo para los emprendimientos alimentarios alternativos, sino para otras áreas de la actividad económica y urbana. En este sentido, sería valioso que se incorpore a este esquema otros factores que incidan directamente en la sostenibilidad urbana, como los flujos de materiales de construcción, la gestión del agua

pluvial o la eficiencia energética en la infraestructura urbana. La colaboración entre diferentes actores, como empresas tecnológicas, instituciones académicas y organismos gubernamentales, podría ser clave para desarrollar herramientas prácticas basadas en el metabolismo urbano que permitan evaluar y optimizar el uso de los recursos de manera más efectiva y reducir la huella ecológica de las ciudades.

Además, las iniciativas comunitarias y las organizaciones de base que gestionan sistemas de producción alimentaria alternativa pueden beneficiarse de la implementación del esquema como herramienta de diagnóstico. Podrían adaptarlo para evaluar sus propios procesos, identificar puntos críticos y generar soluciones para mejorar la eficiencia en la utilización de recursos. El fortalecimiento de estas iniciativas, mediante el apoyo técnico y la capacitación en modelos de metabolismo urbano y economía circular, contribuiría a la construcción de sistemas alimentarios más sostenibles a nivel local, lo cual podría replicarse en otras ciudades con características similares.

Bibliografía:

- Acselrad, H. (1999). Sustentabilidad y ciudad. *EURE (Santiago)*, 25(74), 36-46.
- Águeda, R. M. (2015). Consumo ilimitado, eficiencia y desigualdad urbana. Definición socioecológica del consumo urbano desde las perspectivas del marxismo y el metabolismo. *Territorios en formación*(9), 97-117.
- Alarcón Zambrano, J. A. (2023). Modelo teórico para la ciudad sostenible. *Revista San Gregorio*, 1(55), 138-157.
- Almeida-Guzmán, M., & Díaz-Guevara, C. (2020). Economía circular, una estrategia para el desarrollo sostenible. *Avances en Ecuador. Estudios de la Gestión: revista internacional de administración*(8), 34-56.
- Alonso, I. B., & Pozas, M. B. M. (2019). Acercamiento teórico al concepto de economía circular desde la perspectiva macro de la ciudad y el contexto poblacional extremeño. *Actas del X International Greencities Congress 2019: 10º Foro de Inteligencia y Sostenibilidad Urbana*.
- Arellano-Esparza, C. A. (2022). Seguridad alimentaria y política pública: un desafío civilizatorio. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 32(59).
- Atehortúa Hernández, M. (2020). *La gobernanza ambiental en el Manejo Integral de Residuos Sólidos. Caso de estudio en el municipio de La Ceja del Tambo, Antioquia, Colombia* [Quito, Ecuador: Flacso Ecuador].
- Bank, W. (2016). Urban Agriculture and Food Security: A Global Perspective.
- Barrios, R. (2007). Perspectivas de desarrollo sustentable en América Latina.
- Barro. (2018). Análisis sobre la Autosuficiencia en flujos metabólicos y diversidad de usos y funciones.
- Bergh, J., & Jeroen, V. (1996). Sustainability: Concepts and Indicators.
- Briceño, G. R., & Meléndez, F. L. (2021). ¿Desplegando resiliencia?: Agricultura familiar y sistemas alimentarios en contexto de Covid-19. *revista IECOS*, 22(1), 107-116.
- Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press.
- Brutland, G. H. (1987). Informe Brutland.
- Burt, A. (2018). Urban Agriculture: The Role of Food Production in Building Sustainable Cities. *Journal of Urban Planning and Development*, 144(4).

- Cabrera, G. L. R. (2022). Economía circular:¿ un enfoque económico en la producción o en el ser humano y el medio ambiente? *Revista de la Academia*(33), 84-92.
- Cadavid-Castro, M. A., Álvarez-Castaño, L. S., Quintero-Vergara, S. D., Martínez-Bedoya, X., & Martínez-López, A. P. (2019). Redes alimentarias alternativas de Medellín y el Oriente de Antioquia: espacios de construcción de confianza. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 21(1), 53-69.
- Calle, M. (2016). Planificación territorial y gestión integral de residuos en Ecuador. *Revista de Planificación Urbana*.
- Cantú-Martínez, P. C. (2019). Ciudades sustentables y metabolismo urbano. *Revista Ciencia UANL*, 22(94), 48-56.
- Carrato-Gómez, A., & Roig-Segovia, E. (2022). De la ciudad sostenible a la ciudad hub: obsolescencia y renovación de indicadores urbanos. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 54(213), 563-578.
- Caruncho, M. S. (2023). *Los sistemas alimentarios alternativos de Galicia ante el régimen agroindustrial-global* [Universidade de Santiago de Compostela].
- Centre, I. D. R. (2018). Urban Food Systems for Resilience: An Overview.
- Christopher Kennedy, J. C., and Joshua Engel-Yan. (2007). The Changing Metabolism of Cities. *Revista de Ecología Industrial*, 11, 43-59. <https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107>
- Crojetovich Martín, A. (2004). La ciudad como sistema metabólico: un enfoque material. *Revista de Urbanismo*, 8, 19-29.
- Da Costa Pimenta, C. C. (2022). La Economía Circular como eje de desarrollo de los países latinoamericanos. *Revista Economía y Política*(35), 1-18.
- Dainiz Noray Montoya García, C. J. D. Á. (2023). Índices metabólicos como propuesta para el estudio del metabolismo urbano, el caso de la ZMT, México. *REVISTA ENTROPICO, Revista de Arquitectura y Urbanismo*.
- Díaz Álvarez, C. J. (2014). Metabolismo urbano: herramienta para la sustentabilidad de las ciudades.
- Echevarría, S. (2021). En búsqueda de una ecología política urbana. *Crítica urbana: revista de estudios urbanos y territoriales.*, 4(20), 3.
- Eurostat. (2021). Waste statistics: Municipal waste statistics. *Statistical Office of the European Union*.
- Falappa, M. B., Lamy, M., Vazquez, M., & BOHM, L. E. (2019). De una Economía Lineal a una Circular, en el siglo XXI. *Obtenido de Universidad Nacional de Cuyo: https://bdigital.uncuyo.edu.ar/objetos_digitales/14316/falappa-fce.pdf*.
- FAO. (2004). Seguridad alimentaria como estrategia de desarrollo rural.
- FAO. (2014). Urban Agriculture and Food Security: A Global Perspective.
- FAO. (2017). Reflexiones sobre el sistema alimentario y perspectivas para alcanzar su sostenibilidad en América Latina y el Caribe.
- FAO. (2018). Food Security and Climate Change: A Framework for Action.
- FAO. (2021a). El trabajo decente en los sistemas alimentarios.
- FAO. (2021b). The State of Food Security and Nutrition in the World 2021. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- FAO. (2023). Mejoramiento de la seguridad alimentaria en el hogar.
- Fletes Ocón, H. B., Ocampo Guzmán, G., & Pizaña Vidal, H. A. (2021). Reestructuración de cadenas productivas y situación de los sistemas alimentarios en el Soconusco.
- Forum, W. E. (2015). Feeding 9 Billion: The Role of Innovation in Sustainable Food Systems.
- Gallopin, G. (2003). A systems approach to sustainability: A general framework.
- Garabiza, B., Prudente, E., & Quinde, K. (2021). La aplicación del modelo de economía circular en Ecuador: Estudio de caso. *Revista espacios*, 42(02), 222-237.
- Gema Gonzalez Romero, F. C. G. (2021). Territorio y redes alimentarias alternativas experiencias en la ciudad de Sevilla *Documento de analisis geografico*, 67, 389-415.

- GONZÁLEZ, A., Fernandes, A. C. P., Albrecht, C., ROMAN, D., FLORES, J. A. A., BURGOA, J. M. F. D., DE OLIVEIRA, M. R. M., CARRIÓN, M. J. C., POPELKA, R., & ESPINOSA, R. I. M. (2020). EXPERIENCIA EN EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE TECNOLOGÍAS SOCIALES EN EL CAMPO DE LA SOBERANÍA Y SEGURIDAD ALIMENTARIA Y NUTRICIONAL EN AMÉRICA DEL SUR1.
- González de Alba, I., Ortiz, G., & Hernández, P. (2020). Análisis de la sostenibilidad en zonas metropolitanas. *Revista Mexicana de Estudios Urbanos*, 16(2), 45-60.
- Gordon, D. C. (2018). Sustainable Urban Agriculture: The Role of Green Spaces in Food Security. *Sustainability*, 10(12).
- Guerrero, M. (2008). La huella ecológica y el turismo. *Revista de Turismo Sostenible*, 14(3), 34-49.
- Haberl, H. (2001). The Energetic Metabolism of Societies Part I: Accounting Concepts. *Journal of Industrial Ecology*, 5(1), 11-33.
- Herranz, J. (2007). El desarrollo sustentable en América Latina.
- Herrera, M. A. (2020). Concepto de la ciudad sostenible: principales características y dinámicas. *Memoria de las Jornadas de Investigación y Análisis*, 111.
- Herrera Mancero, J. A., & Vilema Tigxi, B. M. (2019). *Análisis del flujo metabólico de los materiales de construcción en la Ciudad de Riobamba* Universidad Nacional de Chimborazo, 2019].
- HHS, U. (2020). Dietary Guidelines for Americans.
- Higueras, E. (2009). Arquitectura y clima: el diseño bioclimático en un entorno sostenible. *Madrid: Munilla-Lería*.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
- Jacob Cirera, M. M. (2020). Metabolismo urbano y Ecoeficiencia.
- Jaime Ernesto Rivera-Hernández, N. V. B.-O., Alcántara-Salinas, Eric Pascal Houbroun. (2017). ¿Desarrollo sostenible o sustentable? La controversia de un concepto. *Revista Posgrado y Sociedad, Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad Estatal a Distancia*, 5, Número 1, 57-67.
- López-Vega, M. (2021). Evaluación de la gestión de residuos orgánicos en América Latina. *Revista de Gestión Ambiental*.
- Martins, F. J. (2006). Indicators for sustainability assessment.
- Naredo, J. M. (1996). La economía ecológica y el desarrollo sostenible.
- Newton, J. (2013). The Role of Urban Metabolism in Urban Sustainability: Case Studies and Future Directions. *Urban Studies*, 50(5).
- Niño-Soto, A., & Chávez-Martínez, S. (2020). Metabolismo urbano: Reflexiones sobre el crecimiento urbano y el consumo energético. *AUS [Arquitectura/Urbanismo/Sustentabilidad]*(27), 80-85.
- Olivera. (2023). Dimensiones y variables para la caracterización de la vinculación de un emprendimiento alimentario alternativo con el sistema urbano.
- Pallasco, F. O. R. (2023). Metabolismo urbano aplicaciones desde la perspectiva ecosistémica.
- Pengue, W. A., & Rodríguez, A. F. (2021). Metabolismo urbano, neoeosistemas y soluciones basadas en la naturaleza. *ACTAS-Jornadas de Investigación*, 2160-2176.
- Pérez, M., & Chomsky, N. Alimentación y modos directos de abastecimiento en Latinoamérica. *y soberanía: la alimentación como derecho humano*, 179.
- PNAS. (2018). The Environmental Impacts of Food Production.
- Ramírez, D. C. Á. (2019). Implicaciones del metabolismo urbano en el cambio climático. *Vivienda y comunidades sustentables*(6), 79-98.
- Rees, W. (1996a). Revisiting Carrying Capacity: Area-Based Indicators of Sustainability. *Population and Environment*, 17(3), 195-215.
- Rees, W. (1996b). Urban Ecological Footprints: Why Cities Cannot Be Sustainable—and Why They Are a Key to Sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 16(4-6), 223-248.
- Riechmann, J. (1995). Ecodesarrollo: La construcción de un futuro sostenible.

- Rodríguez-Guerra, A., & Baca-Cajas, K. A. (2022). Gestión de residuos sólidos urbanos en Europa y América Latina. *Revista de Ciencias Ambientales*.
- Rodríguez, A., & Govea, A. (2006). Sostenibilidad y desarrollo: Una perspectiva crítica.
- Rodríguez de la Presa, A. (2021). Análisis del impacto ambiental de la ciudad de Madrid mediante la integración del concepto de metabolismo urbano y la metodología de análisis del ciclo de vida. Routledge. (2014). *Adapting Agriculture to Climate Change: Options for a Warmer World*.
- Science. (2021). *Global Food System Transformation: A Review*.
- Security, F. (2015). *Food Security and Urban Agriculture: A Review*.
- Seller, M. (2012). *Participación ciudadana y desarrollo sustentable*.
- SISTEMA MUNICIPAL DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD. (2010). *IV Reunión del Grupo de trabajo de Indicadores de Sostenibilidad de la Red de Redes de Desarrollo Local Sostenible, 4*.
- Solíz, M. (2017). Ecología política y gestión de residuos sólidos en ciudades latinoamericanas. *Revista de Ecología Política*.
- Toledo, V. M. (2002). Metabolismo social: una teoría de la economía humana. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica, 7*, 1-10.
- Tollin, N. (2016). *Economía Circular para una Innovación Territorial: Un enfoque metabólico*.
- Uribe, G. G. (2023). Metabolismo urbano y entropía como catalizadores de la sostenibilidad en sistemas urbanos complejos. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad, 6*, e315-e315.
- Valenzuela-Inostroza, J., Espinoza-Pérez, A., & Alfaro-Marchant, M. (2019). Diseño de la cadena logística inversa para modelo de negocio de economía circular. *Ingeniería Industrial, 40*(3), 306-315.
- Vetrugno, C., & Riaño, D. E. C. (2021). Ciudad Circular, El metabolismo de San Pedro de Macorís como catalizador para el desarrollo urbano sostenible en República Dominicana, una perspectiva desde Colombia. *UCE Ciencia. Revista de postgrado, 9*(4).
- Vilches, A., & Pérez, C. (2012). *Acciones ciudadanas para la sostenibilidad*.
- Wackernagel, M., & Rees, W. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island: New Society Publishers*.
- WHO. (2019). *Food Systems for Healthy Diets*.
- Zafra-Mejía, C. A., & Romero-Torres, D. (2019). Impactos ambientales de los residuos orgánicos no gestionados en Latinoamérica. *Revista Latinoamericana de Ciencias Ambientales*.
- Zudileynis Cruz Morales, Y. R., Rogelio Ballate González, Alejandrina Delgado Día, Reinier Marín Días. (2018). Propuesta para disminuir del grado de contaminación de los residuales líquidos de la Empresa Cárnica Cienfuegos (ECC). *FORUM DE CIENCIA Y TECNICA 2018, 18*.