



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Reutilización de residuos sólidos urbanos para la
producción de energía. Revisión sistemática 2022.**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental**

AUTOR:

Cordova Delgado, Carlos Manuel (orcid.org/0000-0001-5290-9644)

ASESOR:

MSc. Quijano Pacheco Wilber Samuel (orcid.org/0000-0001-7889-7928)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

LIMA – PERÚ
2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a Mi Dios por todas las bendiciones brindadas, a toda mi familia, en especial a mis padres por todo el apoyo económico y emocional que me otorgaron de manera incondicional en mi periodo universitario, incluyendo el ejemplo de superación y sacrificio, el cual hizo realidad el cumplimiento de mis metas. Agradecer también a mis hermanas y hermano por todos los consejos que me brindaron para orientarme a tomar buenas decisiones y, a todos mis amigos que me dieron su apoyo y confianza en situaciones adversas.

Agradecimiento

Agradezco a Dios, padre divino por su protección.

A la universidad Cesar Vallejo, por darme la oportunidad de formar parte de su gran familia de profesionales dedicados a la ingeniería.

A los docentes y profesionales de la Universidad Cesar Vallejo quien me brindaron su apoyo y conocimiento, en especial a mi asesor, al MSc. Ing. Wilmer Samuel Quijano Pacheco quien me oriento durante todo el proceso de titulación, para el desarrollo óptimo de mi trabajo de investigación.

A la facultad de Ingeniería y Arquitectura

Índice de contenidos

Carátula	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de figuras.....	vi
Resumen	vii
Abstract.....	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEORICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	14
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	14
3.2. Categorías, subcategoría y matriz de categorización.....	14
3.3. Escenario	17
3.4. Participantes.....	17
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	17
3.6. Procedimiento	17
3.7. Rigor científico.....	19
3.8. Método de análisis de datos.....	19
3.9. Aspectos éticos	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
V. CONCLUSIONES.....	42
VI. RECOMENDACIONES	43
REFERENCIAS	44
ANEXOS.....	50

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz apriorística.....	15
Tabla 2. Valor calorífico de los residuos orgánicos	22
Tabla 3. Valor calorífico de los residuos inorgánicos	25
Tabla 4. Valor calorífico de la madera.....	27
Tabla 5. Producción de energía eléctrica de residuos sólidos	29
Tabla 6. Producción de combustibles a partir de residuos sólidos.....	30
Tabla 7. Viabilidad de los procesos termoquímicos de recuperación de energía	34
Tabla 8. Viabilidad de los procesos bioquímicos de recuperación de energía	35

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de energía renovables	11
Figura 2. Procesamiento de RSU	13
Figura 3. Proceso de búsqueda de artículos de investigación.....	18
Figura 4. Resultado de los residuos sólidos empleados en la producción de energía	21
Figura 5. <i>Proceso de recolección de gas de los vertederos municipales</i>	24
Figura 6. Resultado de los tipos de energía generados por los residuos sólidos municipales	28
Figura 7. <i>Resultado de las tecnologías de conversión de residuos sólidos</i>	33
Figura 8. <i>Proceso de digestión anaeróbica para la obtención de biogás</i>	37
Figura 9. <i>Comparación entre pirólisis convencional (a) y pirólisis de microondas (b)</i>	39

Resumen

Este estudio se realizó con la finalidad de revisar información sobre la reutilización de residuos sólidos urbanos para la producción de energía. La investigación fue de tipo aplicada, enfoque cualitativo y diseño no experimental. Se empleó como participantes un total de 39 artículos en inglés que tratan el tema de estudio y se desarrollaron durante los últimos 5 años. Estos fueron extraídos de las plataformas de búsqueda Science Direct (46) y Scopus (22), utilizando como técnica el análisis documental y como instrumentos las fichas de registro de información. Los resultados mostraron que, el 93% de los estudios emplean residuos orgánicos para generar energía, siendo utilizados por su alto contenido de humedad. Asimismo, la mayoría de los estudios (73%) se enfocan en la producción de combustibles como el metano y el biogás, los cuales se procesan mediante distintas tecnologías, siendo los procesos termoquímicos como la incineración los más utilizados. Se concluye que, la generación de energía a partir de residuos es factible y es una buena alternativa para reutilizar los desechos orgánicos y contribuir con la reducción de la contaminación ambiental, al generar energía renovable y limpia.

Palabras clave: Residuos urbanos, electricidad, metano, biogás, tecnologías de conversión, viabilidad económica.

Abstract

This study was carried out in order to review information on the reuse of solid urban waste for energy production. The research was of an applied type, qualitative approach and non-experimental design. A total of 39 articles in English that deal with the topic of study and were developed during the last 5 years were used as participants. These were extracted from the Science Direct (46) and Scopus (22) search platforms, using documentary analysis as a technique and information record sheets as instruments. The results showed that 93% of the studies use organic waste to generate energy, being used for its high moisture content. Likewise, most of the studies (73%) focus on the production of fuels such as methane and biogas, which are processed using different technologies, with thermochemical processes such as incineration being the most widely used. It is concluded that the generation of energy from waste is feasible and is a good alternative to reuse organic waste and contribute to the reduction of environmental pollution, by generating renewable and clean energy.

Keywords: Urban waste, electricity, methane, biogas, conversion technologies, economic viability.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, las estimaciones realizadas en el 2018 por el Banco Mundial señalaron que se genera alrededor de 2.010 millones de toneladas por año de desechos urbanos; y una persona promedio puede generar un total de 0,74 Kg de desechos al día, aunque esto varía entre el 0,11 Kg y 4,54 Kg. También debe considerarse que la población con mayores ingresos genera mayor cantidad de desechos, y aunque solo representa el 16% de la población total, representan el 34% de residuos. Además, los residuos sólidos producen el 18 % de las emisiones de metano y entre el 3% y 4% de las emisiones de gases de efecto invernadero en general (Kaza et al. 2018).

En vista del crecimiento de la tasa de generación de residuos urbanos, los gobiernos mundiales emplean diferentes técnicas de disposición para gestionarlos, siendo los vertederos a cielo abierto, los más utilizados; sin embargo, esta técnica no resulta sustentable convirtiéndose en un foco de contaminación, por ello, la producción de energía a partir de los residuos sólidos, surge como una alternativa de reutilización. Estas tecnologías permiten la producción de calor o electricidad a través de procesos térmicos y biológicos promoviendo entornos urbanos limpios y saludables (Kaza y Bhada-Tata, 2018).

La reutilización de residuos tiene una buena proyección en los países con ingresos altos, que cuentan con la tecnología y la legislación necesaria para convertir los residuos urbanos en energía. Un claro ejemplo, son los países de la Unión Europea donde se incrementó el volumen incinerado de residuos de 32 millones de toneladas en 1995, hasta 70 millones de toneladas en el 2018. Asimismo, Alemania recuperó la mayor cantidad de energía un total de 7,1 MWh, le siguen Reino Unido con 4,4 MWh, Francia con 2,5 MWh, Italia con 2,4 MWh y los Países Bajos con 2,2 MWh; con ello se consiguió que 18 millones de europeos tengan acceso a la electricidad y 15 millones a la calefacción (Hockenos, 2021).

Este panorama es diferente para el caso de los países en proceso de desarrollo como China, India, Malasia, Tailandia y Bangladesh, en los cuales, la gestión de los residuos sólidos no es tomada como una prioridad, puesto que, el crecimiento acelerado de la población, los procesos de industrialización y la

urbanización suelen ser los temas más importantes abordados por los gobiernos. Aunado a ello las barreras económicas y financieras impiden una adecuada gestión de los residuos mediante la visión de la economía circular (Valizadeh, Mozafari y Hafezalkotob, 2022).

En la región latinoamericana, se han generado alrededor de 231 millones de toneladas de residuos urbanos, y el 52% son restos de alimentos o desechos verdes, la región llega a manejar adecuadamente el 50% del volumen en rellenos sanitarios con controles adecuados. Algunas ciudades de estos países se han involucrado en sistemas de recuperación de energía en base a los residuos, principalmente mediante la recolección de gases en vertederos (52%), pero además existen proyectos diferentes como los de digestión anaeróbica (26.8%), rellenos sanitarios controlados (15%), reciclaje (4.5%), y rellenos sanitarios sin control (1,5%) (Kaza, et al., 2018). América Latina tiene oportunidades de extender la investigación, enfocándola en la mejora de la gestión de los residuos sólidos y la recuperación de energía de los mismos; sin embargo, la disparidad en las legislaciones y los limitados recursos invertidos en innovaciones tecnológicas, se convierten en una barrera para el manejo de los residuos. Por ello, es necesario la realización de un trabajo multidisciplinar que agilice los procesos de innovación y permita encontrar los recursos para financiarlos (Minatta y Basaní, 2020).

Por otro lado, la revisión de literatura, muestra que las investigaciones de conversión de los residuos urbanos en energía, se enfocan en las operaciones de reciclaje específicas con el fin de lograr un manejo adecuado de los residuos y mantener el ciclo de una economía circular (Rada et al., 2020). Además, existe evidencia que evalúa el potencial de los residuos urbanos para la generación de energía a través de diversos procesos como la producción de gases desde los vertederos, la incineración y la digestión anaeróbica, los cuales contribuyen en la reducción de los desechos urbanos y sirven para realización de actividades domésticas e industriales (Dlamini, Simatele y Kubanza, 2018).

Por lo anterior se plantea el problema general de la investigación: ¿Cómo es la reutilización de residuos sólidos urbanos para la producción de energía 2022? mientras que las preguntas específicas son: ¿Cuáles son los residuos sólidos urbanos utilizados en la producción de energía?, ¿Cuál es el tipo de energía que

se produce a partir del tratamiento de los residuos sólidos urbanos?, ¿Cuáles son las tecnologías de recuperación de energía a partir de residuos sólidos?

El estudio se justificó de manera teórica, puesto que, se recopiló la información de los residuos sólidos y la producción de energía que estos generen, lo que puede ser base para futuros trabajos de investigación. El estudio se justifica de manera social, ya que, se identificaron las mejores tecnologías, que permiten el uso adecuado de los residuos sólidos para que, las personas y organismos de gestión municipal puedan emplearlas. El estudio se justifica ambientalmente, ya que identificó aquellas tecnologías amigables que procesan residuos sólidos y con su implementación se contribuirá en la mitigación de la contaminación ambiental. Finalmente, por el lado económico, se dará en función a la mejor técnica fácil, útil y económicamente viable para el uso de un poblador.

El objetivo general del estudio fue: Revisar información sobre la reutilización de residuos sólidos urbanos para la producción de energía. Mientras que los objetivos específicos son: Identificar los residuos sólidos utilizados en la producción de energía, Identificar el tipo de energía que se produce a partir del tratamiento de residuos sólidos urbanos, Identificar las tecnologías de recuperación de energía a partir de residuos sólidos.

II. MARCO TEORICO

Farouk, Lang, Tahir y Al-Ghamdi (2022), realizaron una descripción del potencial de los residuos sólidos municipales como fuente de energía en Sudán. Para ello, analizaron los datos disponibles sobre gestión y producción de residuos en el estado de Jartum, así como las fuentes de energía empleadas. Los resultados mostraron que, las tecnologías empleadas dependen de la energía hidroeléctrica y la electricidad de los sistemas solares y eólicos. Asimismo, con las tasas de generación de residuos actuales, más de la mitad puede ser empleada para la producción de energía. Se concluye que, la conversión de biomasa en energía en todas sus formas debe reconocerse como una opción importante para Sudán, ya que proporciona simultáneamente energía y varios beneficios ambientales y sociales.

Sohoo et al. (2021), tuvieron por finalidad estimar la producción anual de metano y el potencial de generación de energía de los sitios de disposición de residuos sólidos en Pakistán. Para ello, realizaron estimaciones en base al censo de población del 2017 y los datos disponibles sobre las prácticas de gestión de residuos en las 10 principales ciudades de Pakistán. Los resultados mostraron que, se generan anualmente 31,18 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos lo que emite un total de 12.8 emisiones equivalente de metano. En ese sentido, se estimó que los vertederos pueden generar un total de 62.35 MWh de energía eléctrica, solo con la recuperación del 25% del total de metano emitido. Se concluyó que, es posible utilizar el metano como fuente de energía de manera sostenible, mediante el equipo de transformación necesario.

Aslam et al. (2021), en su estudio tuvieron por finalidad cuantificar los potenciales energéticos de los flujos de residuos de los seguido de cálculos adicionales para determinar la capacidad de generación de electricidad por flujo con base en eficiencias generales. Los resultados evidenciaron que estos flujos de residuos combinados tienen un potencial energético de 385 PJ (para el año base de 2018) generados a partir de 26 924 kilotoneladas (kt). En conjunto, estos residuos pueden producir al menos 1,2 veces la electricidad generada a nivel nacional en 2018 utilizando AD y gasificación junto con un motor de grupo electrógeno diésel. La utilización de estos residuos ofrece ventajas adicionales que

benefician al medio ambiente, ya que se evitan las técnicas habituales de eliminación/gestión de residuos asociadas con estos flujos de residuos.

Boloy et al. (2021), tuvieron como propósito realizar una revisión sistemática de la literatura basado en el método PRISMA. Para ello, se analizaron un total de 10 artículos para el metanálisis que se clasificaron en ocho campos diferentes, utilizando como palabras clave residuos sólidos, waste to energy (WTE) y gestión de residuos. Los resultados evidenciaron que los esfuerzos de los estudios se centraron en la conversión de los residuos urbanos para la generación de electricidad como producto final, sin embargo, existe una limitada investigación de las oportunidades que existen para generar energías limpias y sostenibles. Por ende, se concluyó que, la tecnología de conversión de residuos en energía es una vía o ruta de innovación importante que encuentra numerosas aplicaciones en el sector energético y del transporte y que puede mitigar los efectos sobre el medio ambiente.

Leeuwen, Cappon y Keesman (2021), propusieron un modelo de reducción y minimización para verificar el potencial de los biorresiduos urbanos para generar electricidad. Para ello, se utilizó una unidad acoplada de gasificador y pila de combustible de óxido sólido (SOFC) tomando una residencial de Ámsterdam como unidad de estudio aislada, que se analizó durante un año. Los resultados mostraron que, el uso de biorresiduos garantizó el suministro eléctrico diario, logrando una cobertura de energía fotovoltaica del 16,9% y una cobertura eólica del 94,0% (equivalente a 186 y 165 MW de capacidad instalada). Asimismo, se utilizó más biomasa en invierno, cuando los paneles fotovoltaicos no podían proporcionar la energía necesaria. Se concluyó que, los residuos biológicos tienen el potencial de brindar flexibilidad estacional a los futuros sistemas de electricidad sostenibles

Siddiqi, Haraguchi y Narayanamurti (2020), evaluaron la recuperación de residuos en energía para analizar estocásticamente la viabilidad de esta conversión en ciudades seleccionadas de Asia. La metodología, se basó en la aplicación de un modelo de simulación de Monte Carlo para una muestra de seis ciudades, bajo diferentes escenarios. Los resultados mostraron que, los sistemas WTE pueden generar hasta 290 GWh de electricidad en Karachi y hasta 60 GWh en Delhi a partir de materia prima de residuos municipales de la que se han eliminado materiales

reciclables (como papel y plásticos). Se concluyó que, los sistemas de incineración tradicionales no serán viables debido a los altos costos operativos que presentan, por ende, se obtuvo que es factible el uso de tecnologías híbridas, debido a las bajas tarifas de alimentación y recolección de residuos.

Sayahida et al. (2021), en su estudio, tiene por finalidad encontrar energía eléctrica potencial que se pueda producir a partir de la tecnología de conversión de residuos en energía en Bantargebang, debido al incremento de la demanda de electricidad. Para ello, hace uso de un modelo matemático y la recopilación de datos de fuentes secundarias implantadas por el gobierno de Yakarta. Los resultados mostraron que, el potencial de energía eléctrica que se puede producir puede alcanzar los 8.6 GWh por día, lo que contribuyó hasta en un 9 % a la energía distribuida de Yakarta. Además, al aplicar WTE, también existe el potencial de implementar otros indicadores de ciudad inteligente que ha sido propagado por el gobierno Yakarta.

Azam et al. (2020), en su investigación tuvieron por finalidad explorar la generación, tratamiento y características de la composición físico química de los residuos sólidos urbanos. Se utilizó la técnica de espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) para determinar el contenido de metales pesados y la lixiviabilidad de los componentes de los RSU para verificar el riesgo de contaminación ambiental. Los resultados mostraron que, los componentes físicos de los RSU en Lahore estaban en orden descendente de bolsas plásticas de nailon biodegradables, textiles, pañales y papel, los cuales poseen un potencial de recuperación de energía de 48 Mw y una producción de 2,000 toneladas de RSU diarias. Los autores concluyeron que la gestión adecuada de los residuos sólidos y la correcta identificación de las tecnologías de conversión de residuos, se convierte en una alternativa potencial de energía renovable.

Azevedo et al. (2020), en su investigación tuvo por finalidad caracterizar los residuos sólidos generados en una unidad de alimentación y nutrición de Brasil, evaluando su potencial para generar energía mediante biogás. Para ello, se realizó una recopilación de datos de la generación de residuos durante tres meses. Los resultados mostraron que la producción total de residuos fue de 209.35 toneladas, los que pueden generar una cantidad de 266,492.16 KWh al año, que lograría la

atención de la demanda energética de las residencias. Por ende, se concluyó que, la digestión anaeróbica es una tecnología factible para la producción de energía, por ser ambientalmente aceptada.

Yan et al. (2019), en su estudio, presentaron como finalidad realizar la conversión energética de residuos alimentarios a través de la gasificación. Para ello, utilizaron residuos de arroz, pollo y aceite de cocina que se procesaron a través de un reactor por lotes en condiciones de agua crítica. Asimismo, se evaluaron los parámetros operativos de temperatura (420–500 °C), el tiempo de residencia (20–60 min) y la concentración de la materia prima (2–10 % en peso), así como cuatro catalizadores. Los resultados mostraron que, el rendimiento de hidrógeno más alto (20,37 mol/kg) con una selectividad de H₂ de 113.19 % y el rendimiento de gas total de 38,36 mol/kg, se lograron con la adición de KOH al 5%. Mientras que el bajo poder calorífico de los productos gaseosos de los experimentos catalíticos con KOH aumentó en un 32,21% en comparación con el experimento no catalítico. Se concluyó que, la gasificación de agua supercrítica (SCWG) con adición de KOH puede ser una potencial tecnología aplicada para el tratamiento de residuos alimentarios.

Dos Santos et al. (2019), tiene por finalidad evaluar la generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos, a través de incineración, la extracción de biogás de rellenos sanitarios y la digestión anaeróbica. Para ello, se realizó un análisis económico empelando el valor actual neto y costo nivelado de energía eléctrica. Los resultados mostraron que el relleno sanitario tiene el costo unitario más bajo, seguido del digestor anaeróbico, la combinación del digestor anaeróbico con incineración y finalmente el incinerador. El valor presente neto, tiene un valor positivo solo para la opción de relleno sanitario, por ende, la viabilidad económica del proyecto solo es posible para los casos en que se considera la recuperación de energía a través de biogás de los vertederos, por lo cual, se concluye que se requieren de incentivos y políticas de apoyo para permitir que las tecnologías que son ambientalmente viables, se conviertan en económicamente rentables y resulten atractivas como alternativa de inversión.

Wang et al. (2018), en su investigación tuvieron por finalidad evaluar los beneficios energéticos y ambientales de la utilización de desechos para la

recuperación de energía mediante el desarrollo de un modelo IO (de entrada y salida) en ciudades chinas. Para ello, elabora cuatro tipos de aplicaciones de conversión de desechos en energía (WTE), que incluyen la incineración de desechos combustibles, biogás de desechos de alimentos, biogás de aguas residuales orgánicas y biogás de estiércol ganadero para su desarrollo industrial. Los resultados revelaron que la generación de energía a partir de la recuperación de residuos podría ascender a 1.6×10^9 kWh, de los cuales la mayor parte proviene de la incineración de desechos, que representará el 50.4% para 2025. Se concluyó que, los métodos y resultados presentados proporcionen al gobierno local referencias para la toma de decisiones en la gestión de residuos y la planificación bioenergética.

Islam (2018), en su investigación, evaluó el potencial de energía renovable de los residuos urbanos y los beneficios a través de la reducción de carbono en Bangladesh. Para ello analizó la generación de residuos de siete corporaciones, 308 municipios y 208 áreas urbanas de la ciudad; mientras que el potencial energético se evaluó en seis escenarios a través de los modelos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Los resultados mostraron que la emisión total de GEI observada estuvo en el rango de 3.45 - 4.68 millones de toneladas de CO₂ equivalente; mientras que la proyectada entre 5.45- 9.59 millones de TM CO₂ eq. para el 2050. Asimismo, el potencial de generación de electricidad renovable proyectada estuvo en el rango de 4,173.90 - 5,645.30 GWh para 2030 y 6,582.48 - 1,1579.12 GWh para el 2050. Se concluyó que, la incineración mixta de residuos es una fuente de electricidad renovable respetuosa con el clima de las zonas urbanas en Bangladesh.

Zheng, Ying, Wang y Chen (2018), en su investigación tienen por finalidad producir hidrógeno y gas de síntesis a partir de la gasificación con vapor de los residuos sólidos urbanos con reutilización de dióxido de carbono (CO₂). Para ello, realizaron un experimento teniendo en cuenta la temperatura de la gasificación (1000-1100°C) y la relación entre el CO₂ y el vapor (0.5-3). Los resultados mostraron que, al aumentar la relación entre el CO₂ y el vapor dentro del rango 0-5 y 2.5, se incrementa el rendimiento de hidrógeno (18,82 mol/kg-msw) y del dióxido en 50,22 %, lo que genera una mejora de la eficiencia de conversión. Bajo esta

condición se obtienen los valores más altos de 63,19% para la eficiencia del gas frío, 0.95 Nm³/kg-msw para el rendimiento de gas y 12.41 Mj/Nm³ para el valor calorífico inferior. Se concluyó que, la gasificación de RSU con la adición de CO₂ tiene la ventaja de convertir residuos en energía, reutilizar CO₂ y producir gas de síntesis e hidrógeno.

Xin, Ma y Liu (2018), en su investigación desarrollaron un proceso para el desperdicio de alimentos, integrando la hidrólisis ultrarrápida y las celdas de combustible microbianas para la recuperación de energía y recursos. Para ello realizaron un experimento en el cual, hidrolizaron los desechos con una mezcla de hongos y separaron los sólidos, que se convirtieron fácilmente en biofertilizante, mientras que el líquido se utilizó para generar electricidad directa con una eficiencia de conversión de 0,245 kWh/kg. Los resultados mostraron que los desperdicios podían producir alrededor de 192,5 millones de kWh de electricidad y 74.390 toneladas de biofertilizante seco. Además, el proceso realizado es más respetuoso con el medio ambiente en comparación con la digestión anaeróbica y resulta viable en términos económicos por los mínimos costos. Se concluyó que, la recuperación simultánea ultrarrápida de recursos y electricidad con cero descargas sólidos es viable y genera un valor considerable de energía.

Con respecto a las teorías relacionadas, los residuos son desechos que se generan como producto de las actividades domésticas, industriales o comerciales que realizan los seres humanos. Estos se clasifican en residuos sólidos urbanos (RSU), residuos industriales, residuos de biomasa y residuos biomédicos (Sharma et al., 2021). De manera particular los RSU se componen de una variedad de residuos que generamos en el curso de la vida cotidiana y en la realización de actividades comerciales; estos son básicamente no peligrosos, biodegradables o no biodegradables, de materiales orgánicos e inorgánicos, y algunos pueden ser reutilizables (Abbasi, 2018).

Los RSU también conocidos como desechos sólidos municipales generalmente están formados por desechos de cocina, desechos de jardín, papel y cartón, plástico y caucho, metal, vidrio, desechos electrónicos, materiales inertes

y basura miscelánea (Nanda y Berruti, 2020). Los desechos de cocina y de jardín en conjunto constituyen la fracción orgánica de los desechos sólidos municipales; mientras que, la basura miscelánea es la más heterogénea, pues incluye textiles, telas, residuos biomédicos, productos de higiene personal, artículos para el cuidado de la salud, cosméticos, productos farmacéuticos, arena para mascotas, cuero, residuos de caucho y polímeros (Dornau et al., 2020).

Estos residuos son gestionados por las municipalidades de cada ciudad o jurisdicción. La gestión de RSU involucra un conjunto de procesos que se agrupan en función de los objetivos de la gestión, conocidos como las 3R: reducción, reutilización y recuperación (Rizwan, Saif, Almansoori y Elkamel, 2018). La reducción de residuos significa evitar que se produzcan residuos, mientras que la reutilización de desechos sólidos incluye la recolección, la reprocesamiento y la recuperación de determinados materiales de desecho, por ejemplo, metal, vidrio, papel y plástico para fabricar nuevos materiales o artículos (Gu, 2019).

Por último, la recuperación de recursos incorpora la reutilización de materiales que tienen un alto contenido de nutrientes y se pueden utilizar para mejorar la calidad del suelo y la transformación de tipos específicos de desechos en energía valiosa (Glushkov, et al., 2018). La separación y división adecuada de los residuos metropolitanos en la parte reciclable, los residuos sobrantes y la parte natural, seguida de su pretratamiento, es clave para una práctica de gestión de residuos viable (Vaish et al. 2019). Precisamente es en esta fase de recuperación en que se pueden utilizar los residuos sobrantes (aquellos que no se pueden reciclar) para otras actividades de provecho, como la conversión en energía (Yaashikaa, 2020).

Los residuos sólidos juegan un papel importante en la generación de diferentes formas de energía requeridas para aplicaciones en diversos sectores, por ejemplo, servicios públicos, industria, construcción y transporte (Fayegh y Rosen, 2020). Las tres principales fuentes de energía son los combustibles fósiles y los recursos nucleares; sin embargo, existen fuentes de energía renovables, que se muestran en la figura 1, como la energía solar, eólica, de biomasa, geotérmica e hidroeléctrica, que se utilizan para reproducir energía y, por lo tanto, son muy útiles para combatir las crisis energéticas (Bhatt et al., 2021). A diferencia de los combustibles fósiles, las fuentes de energía renovable brindan protección

ambiental, un entorno libre de contaminación, seguridad energética y beneficios económicos (Qazi et al. 2019).

Figura 1. Tipos de energía renovables



Fuente: Adaptado de Singh et al. (2021)

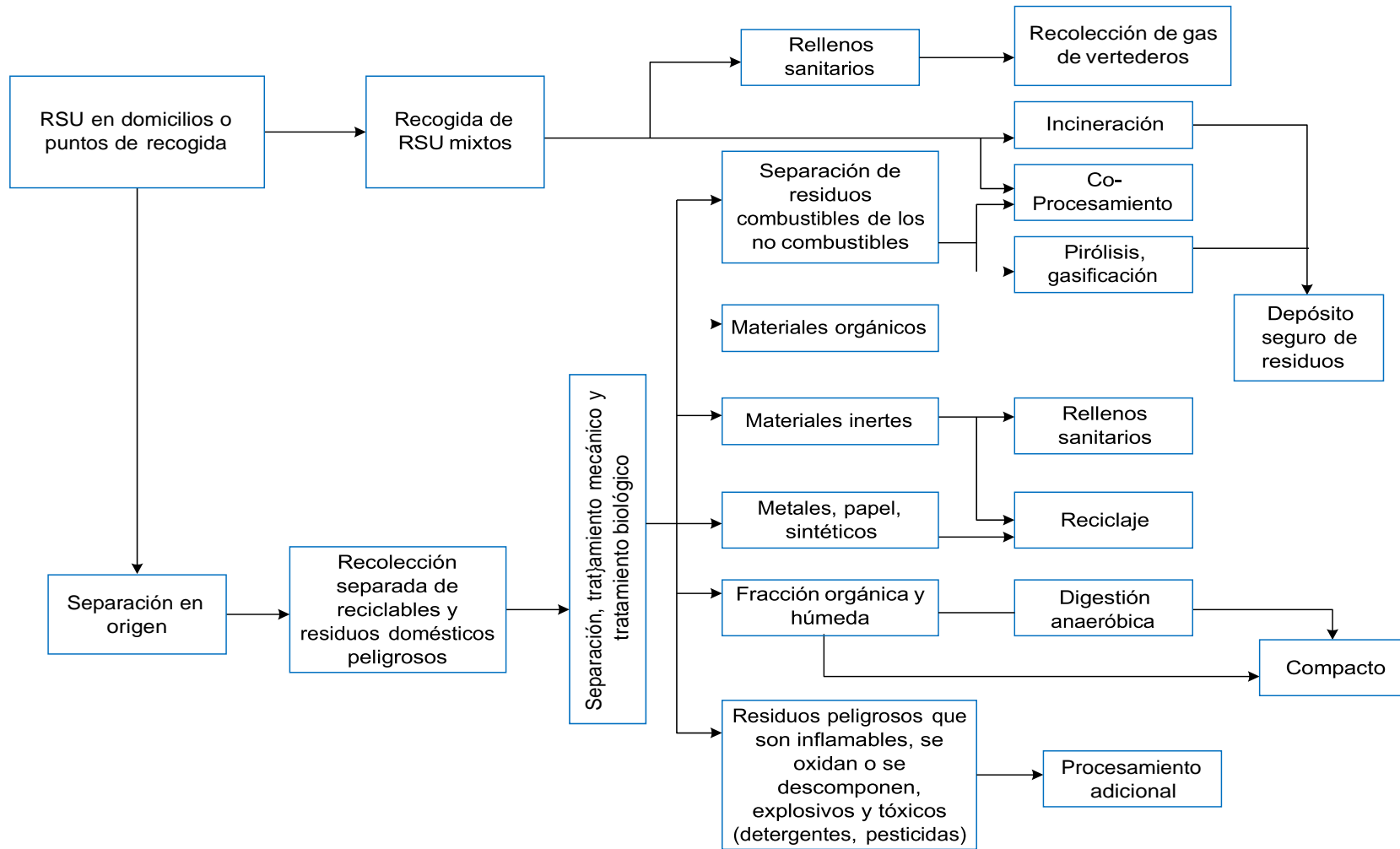
La conversión eficaz de los RSU es una forma innovadora y sostenible de proporcionar soluciones de gestión eficaces para cerrar la brecha entre los desechos y el suministro de energía (Dlamini et al. 2018). El tratamiento primario de los RSU proporciona energía en forma de electricidad o calor. Por ende, para recuperar la energía de los desechos se emplean diversas técnicas, como la conversión térmica, la conversión bioquímica, la conversión termoquímica y la conversión electroquímica. Todas estas técnicas dependen de la calidad de los desechos, la cantidad de desechos, la forma de energía a la que se aspira, los requisitos del cliente, las reglas y los estándares del ministerio ambiental del país y las condiciones financieras de las empresas privadas (Kumar et al., 2019).

La combustión de residuos a energía (WTE) o conversión térmica, se define como un proceso de combustión controlada, que utiliza un dispositivo cerrado para descomponer térmicamente los residuos sólidos en combustibles en un residuo de ceniza que contiene poco o nada de material combustible y que produce

electricidad, vapor u otra energía como un resultado (Annepu, 2012). Por su parte, los métodos termoquímicos incluyen la incineración, la gasificación térmica y la pirólisis, de los cuales el más utilizado es la incineración, que tiene la ventaja de disminuir en gran medida los residuos sólidos en cantidades de hasta 70% y volúmenes, hasta 90% para relleno sanitario y eliminación de patógenos (Abbasi, 2018).

Los procesos bioquímicos se basan en la descomposición de los componentes orgánicos de los desechos, en presencia y sin presencia de oxígeno, con el fin de producir compost o energía. Dentro de estos procesos se encuentran la fermentación y la digestión anaeróbica (Moya, 2017). El proceso de fermentación se subdivide en fermentación oscura, y la fotofermentación, los cuales permiten obtener como producto final el etanol, hidrógeno y biodiesel; mientras que la digestión anaeróbica es la descomposición biológica de la materia orgánica en los desechos bajo la influencia de microbios en un ambiente deficiente en oxígeno (Ayodole, Ogunjuyigbe y Alao, 2017).

Figura 2. Procesamiento de RSU



Fuente: Adaptado de Rajesh et al. (2019).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, puesto que, se enfocó en la búsqueda de información detallada sobre la recuperación de energía de los residuos sólidos, con fines de hacer una recopilación sobre qué es lo que se está estudiando y cuáles son las áreas del conocimiento que no se han abordado a profundidad.

Además, tuvo un enfoque cualitativo ya que, se analizaron los hallazgos de otras investigaciones, caracterizando los tipos de residuos que se utilizan en la producción de energía, el tipo de energía resultante, las tecnologías empleadas para la transformación de los residuos y la viabilidad de las mismas.

3.1.2. Diseño de investigación

La investigación tuvo un diseño no experimental, puesto que los resultados obtenidos se basaron en otros estudios, los cuales fueron tomados tal como los presentaron los investigadores, sin alterar los datos y la información recopilada a conveniencia propia. Por lo cual, la información presentada corresponde a evidencia veraz sobre distintas realidades de estudio.

Es de enfoque cualitativo y diseño narrativo, ya que, se enfocó en analizar los hallazgos de otras investigaciones, caracterizando los tipos de residuos que se utilizan en la producción de energía, el tipo de energía resultante, las tecnologías empleadas para la transformación de los residuos y la viabilidad de las mismas.

3.2. Categorías, subcategoría y matriz de categorización

Tabla 1. Matriz apriorística

Problemas	Objetivos	Categorías	Subcategorías	Criterio	Unidad de análisis
¿Cuáles son los residuos sólidos urbanos utilizados en la producción de energía?	Identificarlos residuos sólidos para la producción de energía	Residuos empleados para producir energía	Residuos orgánicos	Componentes según parámetros energéticos	Mydlarz y Wieruszewski (2022) Adeboye et al. (2022) Sohoo et al. (2021) Sayadiha et al. (2021) Ilmas et al. (2021) Aslam et al. (2021) Azevedo et al. (2020) Klingenberg et al. (2020) Ibikunle et al. (2020) Rudra y Tesfagaber (2019) Hidalgo et al. (2019) Siddiqui et al. (2019) Gosh et al. (2018) Chen (2018) Taspinar y Uslu (2018)
			Residuos inorgánicos		
¿Cuál es el tipo de energía que se produce a partir del tratamiento de los residuos sólidos urbanos?	Identificar el tipo de energía que se produce a partir del tratamiento de los residuos sólidos urbanos	Tipo de energía de los residuos sólidos urbanos	Eléctrica	Según cantidad de energía producida	Mondal (2022) Zahedi y Daneshgarb (2022) Liang et al. (2022) Ferreira et al. (2021) Mozhiarasi et al. (2021) Ebrahimian et al. (2020) Katinas et al. (2019) Mahmoodi, Karimi y Taherzadeh (2018) Valentino et al. (2018) Yi, Jang y An (2018) Farmanbordar, Kamiri y Amiri (2018) Chan et al. (2018)
			Calorífica		
			Combustibles		

¿Cuáles son las tecnologías de recuperación de energía a partir de residuos sólidos?	Identificar las tecnologías de recuperación de energía a partir de los residuos sólidos	Mejores Tecnologías de recuperación de energía a partir de RSU	Procesos termoquímicos Procesos bioquímicos	Según la viabilidad económica	Padilha y Mesquita (2022) Sun et al. (2022) Alayi y Rouhi (2020) Mbalane y Oboirien (2020) Haeldermans et al. (2020) Dos Santos et al. (2019) Yong et al. (2019) Panepinto y Zanetti (2018) Fei et al. (2018) Yang et al. (2018) Zeng et al. (2018)
--	---	--	--	-------------------------------	---

3.3. Escenario

El estudio no tiene un escenario en particular, por lo cual, éste estuvo constituido por los lugares de estudio de las investigaciones revisadas, que estarán formadas por aquellos lugares que han implementado procesos para la recuperación de energía como medio de gestión de los residuos sólidos urbanos.

3.4. Participantes

La investigación no cuenta con participantes, sin embargo, se analizaron los artículos de revistas indexadas que contribuyeron a dar respuesta a los objetivos de la investigación. Para ello, se seleccionaron un total de 39 artículos en inglés que tratan el tema de estudio y se desarrollaron durante los últimos 5 años de estudio. Estos fueron extraídos de las plataformas de búsqueda Science Direct y Scopus.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

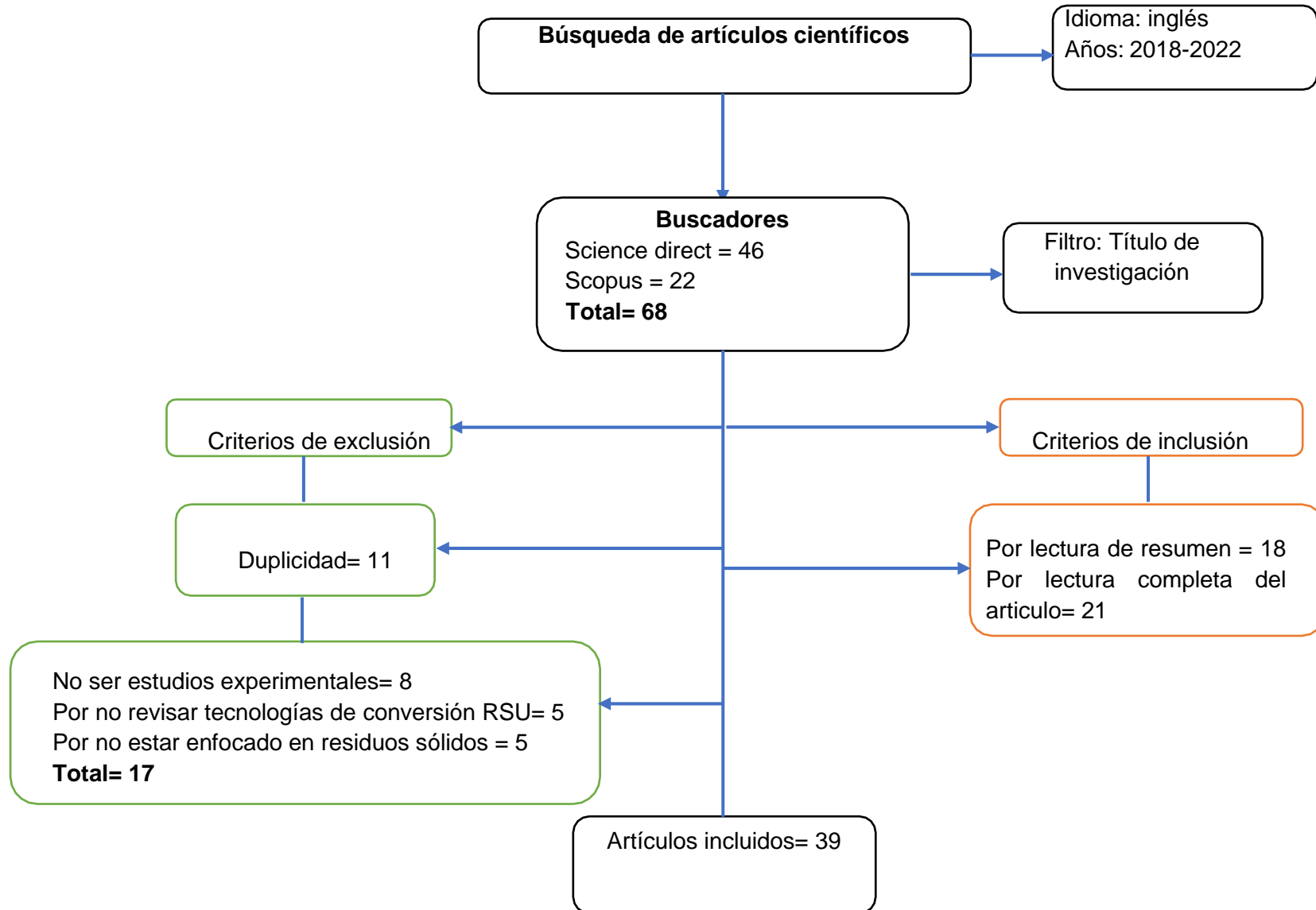
La técnica de investigación empleada el análisis documental, ya que, se revisaron los estudios realizados por otros investigadores durante los años 2018-2022 con el fin de extraer los datos e información relevante que permitieron conocer el potencial energético de los residuos sólidos.

Como instrumento de recolección, se emplearon tres fichas de registro de información (ver anexo 1), que respondieron a los objetivos de investigación y que permitieron sintetizar la información de los artículos de acuerdo a las subcategorías identificadas.

3.6. Procedimiento

Para seleccionar los artículos del estudio, se procedió a la búsqueda en fuentes confiables como Scopus y Science direct obteniendo diferentes investigaciones filtradas por las palabras clave: urban waste, solid waste, waste to energy, energy Recovery, technologies, economic viability. Se filtraron aquellos resultados que se encontraba en inglés y evaluaban el periodo de estudio 2018-2022. En la figura 1, se detalla el procedimiento de selección.

Figura 3. Proceso de búsqueda de artículos de investigación



3.7. Rigor científico

Se cumplió con el criterio de credibilidad que, según Campos (2018), se refiere a la veracidad de la información y de los resultados. Por ende, en esta investigación, se emplearon artículos de investigación extraídos de fuentes confiables, lo que permitió confirmar que la información utilizada pertenece a estudios que han seguido el método científico de manera rigurosa y cumpliendo con los parámetros exigidos por las revistas.

Asimismo, se cumplió con el principio de confirmabilidad, que tal como lo menciona Espinoza (2020), se refiere a la objetividad y neutralidad de parte del investigador. En ese sentido el investigador fue objetivo en el análisis de los resultados. Asimismo, otros investigadores pueden tener acceso a los artículos de investigación utilizados en el estudio para comprobar que los datos son reales, puesto que los artículos encuentran debidamente referenciados.

Se cumplió con el criterio de reproducibilidad que se enfoca en capacidad del estudio para poder ser replicado por otros investigadores (Tracy, 2021). En ese sentido, la investigación detalló minuciosamente la metodología empleada con el fin de que ésta sea replicada para otros escenarios y se verifique la importancia de la reutilización de los residuos urbanos para mitigar los efectos adversos por contaminación y mejorar la gestión actual de residuos.

3.8. Método de análisis de datos

La información y datos extraídos de los artículos, se ordenó mediante una hoja de Microsoft Excel, lo que permitió realizar un análisis cuantitativo de los artículos, presentado por medio de gráficos de barras y tablas que facilitaron la lectura de la información.

3.9. Aspectos éticos

El autor de la investigación cuenta con las competencias profesionales y científicas necesarias para realización del estudio, lo que avala el desarrollo y publicación del estudio. Asimismo, se cumplió con el principio de respeto a la propiedad intelectual. De esta manera, de acuerdo con el Código de Ética de la universidad, se respetaron los derechos de propiedad intelectual de los estudios

empleados, para ello, se recurrió al correcto citado y referenciado de los artículos empleados en esta investigación, siguiendo los estándares de la Normas ISO 690, lo cual ha sido comprobado mediante el empleo del programa Turnitin.

Por otro lado, se cumplió con el principio de probidad, puesto que, la investigación se ha realizado con honestidad, garantizando que la credibilidad en el tratamiento de los datos encontrados en las diferentes investigaciones. De este modo, la información extraída corresponde a los resultados de los estudios revisados, los cuales no se modificaron en beneficio del investigador.

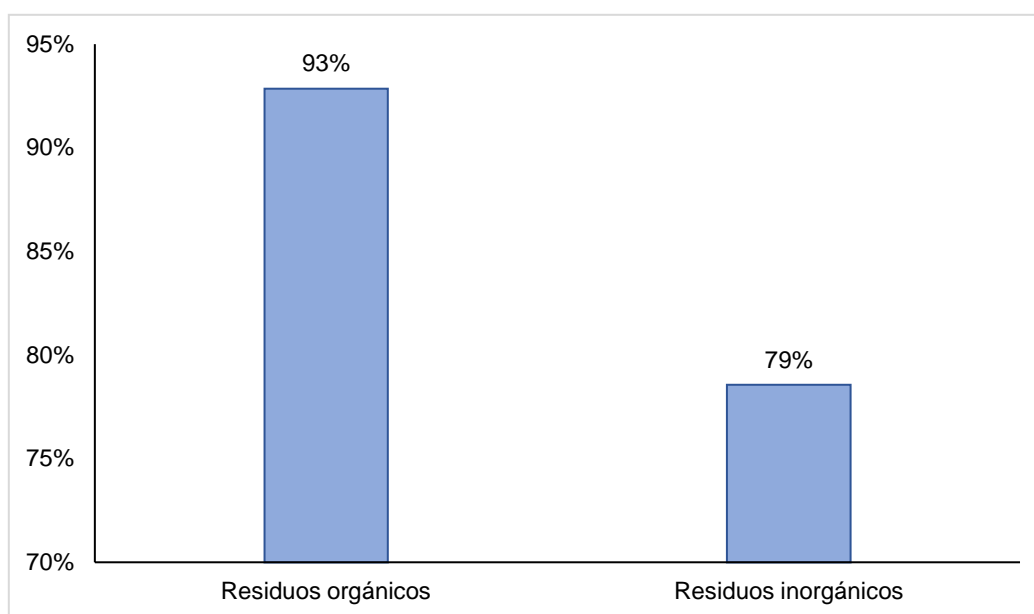
Por último, se cumple con el principio de transparencia, ya que el estudio será publicado para que otros investigadores interesados puedan replicar la metodología de revisión documental y verificar la validez y confiabilidad de los resultados al consultar los artículos empleados en el estudio.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado, se presentan los principales hallazgos observados de la revisión de 39 artículos científicos referidos a la reutilización de residuos sólidos para la generación de energía. Se detallaron los principales recursos empleados, de acuerdo a sus características caloríficas, los tipos de energía que se generan y las tecnologías de recuperación más empleadas en diferentes países, haciendo énfasis en la viabilidad de estos procesos.

IV.1. Residuos sólidos urbanos empleados en la producción de energía

Figura 4. Resultado de los residuos sólidos empleados en la producción de energía



En la figura 4, se observa que, de los 15 artículos analizados que tratan sobre los tipos de residuos reutilizados para generar energía, el 93% estudiaron la utilización de residuos orgánicos para la obtención de energía, formados por desechos de jardines, así como desechos de cocina (cáscaras de vegetales y frutas). En su mayoría, son obtenidos de los vertederos a cielo abierto, que permiten la captura de gases como el metano. Por su parte, el 79% de los artículos utilizaron residuos inorgánicos como plástico, papel, cartón, vidrio y madera para la generación de energía. Los artículos destacan el potencial de la fracción

orgánica de los desechos sólidos para generar energía, sin embargo, la presencia de residuos inorgánicos como plástico incrementa el valor calorífico.

Tabla 2. Valor calorífico de los residuos orgánicos

Tipo de residuos sólidos	Valor calorífico superior	Valor calorífico inferior	Potencial energético	Autor	
Residuos orgánicos	21, 582.8 kJ/kg	21, 580.1 kJ/kg	N.E	Adeboye et al. (2022)	
	N. E	N.E	124.7 Mwh.	Sohoo et al. (2021)	
	29 MJ/kg		141,247 kw	Ibinkule et al. (2020)	
	Fracción orgánica de	19.7 MJ/kg	15.7 MJ/kg	6,213 MWh	Ilmas et al.
	residuos municipales	17.4 MJ/kg	15.60 MJ/kg	40,897 MWh	(2021)
	en vertederos	19.17 Mj/kg	3.03 Mj/kg	N. E	Hidalgo et al. (2019)
		N. E	N. E	9.86×10^8 MJ	
		N. E	N. E	4.06×10^8 MJ	Gosh et al. (2018)
		N. E	N. E	8.11×10^8 MJ	
		15 MJ/kg		N. E	Siddiqi et al. (2019)
Cáscaras de frutas y vegetales	4,095.50 kJ/kg		N. E	Chen (2018)	
	3,498 kcal/kg	1,711 kcal/kg	N. E	Taspinar y Uslu (2018)	
	N.E	N.E	266, 492.16 kWh	Azevedo et al. (2020)	

N.E= No específica. Mj= megajoule. Mw= megawatts

En la tabla 2, se observa el valor calorífico y potencial energético alcanzado por los residuos orgánicos, considerando que las diferentes investigaciones, utilizan la fracción orgánica de los residuos de los vertederos en la generación de energía y los desechos alimentarios extraídos de los vecindarios. La fracción orgánica de RSU, es considerada como una fuente potencial, debido a su cantidad de humedad; sin embargo, los valores caloríficos de los residuos, depende de otras propiedades fisicoquímicas, como el carbono fijo, la materia volátil o la cantidad de cenizas que generan.

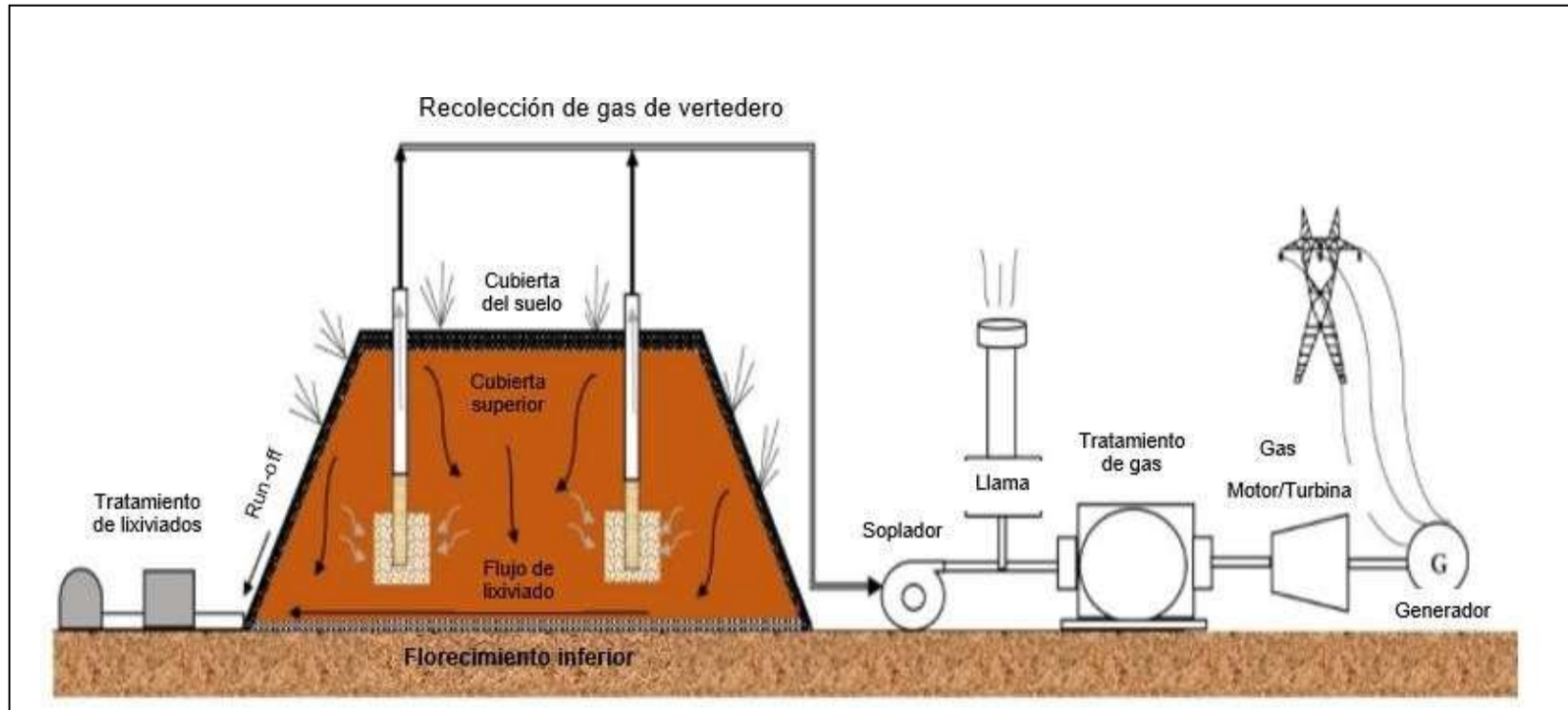
En ese sentido, una estudio realizado en Osogbo, muestra que la fracción orgánica de los RSU, representaron el 35.71% del total de residuos, generando un valor calorífico superior de 21,582.8 kJ/kg e inferior de 21,580.1 kJ/kg, los cuales, resultaron ser adecuados, debido a las propiedades fisicoquímicas de los desechos orgánicos, que alcanzaron un 48.74% de humedad y un bajo contenido de cenizas 6.86%, lo que indica una menor cantidad de sal, metales pesados, cloro y otros contaminantes, favoreciendo el procedimiento para el medio ambiente (Adeboye et al., 2022).

De la misma manera, se encontraron valores caloríficos superiores entre 17.4 MJ/kg y 19.7 MJ/kg, los cuales son capaces de generar una potencia de electricidad de 6,213 y 40,897 MWh, respectivamente. Esto fue posible, debido a que el contenido de humedad de los RSU era significativamente alto, entre 40% y 53 % (Ilmas et al., 2021). Además de la humedad, otra de las características importantes, es el porcentaje de carbono fijo en los RSU. Debido al alto contenido de carbono, se encontró que los RSU generaron 124.7 MWh de energía eléctrica (Sohoo et al., 2021). Mientras que, en otros casos, la situación fue diferente, se alcanzó un potencial energético de 141,247 Kw, un porcentaje bastante alto, a pesar de presentarse un porcentaje bajo de carbono (29.2%) en los residuos (Ibinkule et al., 2020).

Estas disyuntivas encontradas, revelan que las propiedades fisicoquímicas de la fracción orgánica de los residuos determinan su efectividad para generar energía, lo cual, depende del tratamiento al que se van a someter los residuos,

puesto que, en algunos estudios, mientras mayor sea el contenido de humedad o de carbono, mejores resultados va a generar para el proceso de captación de gases como el metano, que se muestra en la figura 5, y la producción de electricidad, mientras que, para los procesos de incineración, es preferible minimizar el contenido de humedad y de cenizas para mantener la eficiencia del proceso y mitigar los efectos de contaminación ambiental.

Figura 5. *Proceso de recolección de gas de los vertederos municipales*



Fuente: Tomado de Soho et al. (2021).

Por otro lado, algunas investigaciones, analizaron el potencial energético de los desechos o residuos alimentarios, seleccionados en los vecindarios, encontrando un valor calorífico promedio de 4,000 kJ por cada Kg de RSU, cuyo nivel está por debajo del valor mínimo de 7.5 MJ/kg que debe proporcionar un cuerpo sólido para generar energía (Chen, 2018; Sayadiha et al., 2021). Sin embargo, otros estudios encontraron valores caloríficos óptimos, que lograron 15 MJ/kg, los cuales, representan una alternativa viable, incluso para la construcción de una planta de energía que facilite el funcionamiento de una industria (Siddiqi et al., 2019). Mientras que, otros residuos, obtuvieron un total de 3,498 kcal por cada kg, obteniendo un valor óptimo para la incineración y obtención de energía, debido a la poca humedad presente en los residuos (Taspinar y Uslu, 2018).

Como se observa, los residuos sólidos deben contar con un poder calorífico entre 7.5 y 17 MJ/kg para ser considerado como una fuente de combustible; por lo tanto, los valores encontrados en las diferentes investigaciones revelan que la utilización de la fracción orgánica de los residuos sólidos resulta una buena alternativa como fuente de energía renovable, incluso mejor que solo el empleo de desechos alimentarios del hogar, sobre todo para los países menos industrializados, en que los servicios básicos, como el alumbrado público, no se distribuyen a toda la población.

Tabla 3. Valor calorífico de los residuos inorgánicos

Autor	Valor calorífico de los residuos inorgánicos				
	Plásticos	Madera	Papel	Cartón	Vidrio
Sayadiha et al. (2021)	1,038.32 Kcal/Kg	906.08 Kcal/Kg	2,884.84 Kcal/Kg	N.E	N.E
Ibinkule et al. (2020)	5.48 MJ/Kg	0.22 MJ/Kg	1.19 MJ/Kg.	2.58 MJ/Kg	N.E
Hidalgo et al. (2019)	30.98 MJ/Kg	N.E	19.72 MJ/Kg.	N.E	31.84 MJ/Kg.
Siddiqi et al. (2019)	45 MJ/Kg	19 Mj/Kg	16 MJ/Kg	N.E	N.E
Chen (2018)	19,105.83 KJ/Kg	N.E	12,105.83 KJ/Kg	N.E	140.53 KJ/Kg.
Rudra y Tesfagaber (2019)	Combinación plástico, papel y cartón = 21.8 MJ/Kg				N.E

N. E= No específica. Kcal= kilocalorías. MJ= Megajoules

Otro punto a considerar, es el valor calorífico de los residuos inorgánicos formados por el papel, cartón, plásticos, madera y vidrio que se muestran en la tabla 3, siendo el plástico y el papel, los recursos más empleados para la producción de energía. Existe una discrepancia en cuanto al valor calorífico mínimo que los residuos deben alcanzar para ser considerados eficientes para la conversión de energía. Los valores caloríficos por debajo de las 1,200 kcal/kg, hacen que los residuos sean ineficientes para el proceso de incineración (Sayadiha et al., 2021). Mientras que, si los valores bajan de 2,400 cal/kg o 10 MJ/kg, no pueden tener una combustión independiente, es decir, es necesario la adición de combustibles como un agregado para generar energía suficiente (Siddiqi et al., 2019).

En relación al empleo de residuos plásticos para la generación de energía, algunos estudios encontraron valores caloríficos altos para estos desechos. De este modo, el máximo valor calorífico superior alcanzado fue de 45 MJ/Kg (Siddiqi et al., 2019). Por otro lado, las propiedades de los plásticos también resultan importantes para generar energía. Un estudio encontró un valor calorífico de 5.48 MJ/Kg para estos residuos, de los cuales el 70% se convirtió en combustible y el 30% quedó como residuo inutilizable. Este panorama se debe a que los plásticos alcanzaron un contenido de carbono fijo del 96.56% y un contenido de cenizas de 1.02%. Asimismo, se demostró que, el aumento del carbono fijo en 1%, incrementa el poder calorífico en un 27% (Ibinkule et al., 2020).

A pesar que, los residuos plásticos tienen altos valores caloríficos (19,105.83 KJ/Kg) en comparación con el papel y el vidrio; algunos estudios revelaron que, la incineración de desechos de papel contribuye con valores superiores en la producción de energía eléctrica (Chen, 2018). Sin embargo, se debe considerar que el tratamiento tanto de plásticos como papel genera un costo ambiental, pues contribuyen con la generación de gases de efecto invernadero, aproximadamente con 53.92 Gg de CO² equivalente (Chen, 2018; Sayadiha et al., 2021). Asimismo, de manera particular, el plástico emite rastros de cloro y otros contaminantes en las cenizas, lo que reduce su eficiencia (Hidalgo et al., 2019).

Debido a las diferentes propiedades de los residuos como el contenido de carbón fijo y la cantidad de cenizas generadas, el plástico y el papel, resultan con mayor eficiencia energética en comparación con el cartón y el vidrio. Sin embargo, se debe considerar que, el combustible derivado de los residuos plásticos, requiere de una mayor limpieza, al encontrarse rastros de cloro en su composición. Por ende, con el fin de aprovecharlos, es posible obtener energía de un proceso de combinación de residuos, (valor calorífico = 21.8 MJ/kg), considerando que los plásticos tienen como ventaja incrementar el contenido calórico de la mezcla (Rudra y Tesfagaber, 2019).

Tabla 4. Valor calorífico de la madera

Autor	Valor calorífico de la madera	
Klingenberg et al. (2020)	Cenosisigma pluviosum	15.14MJ/Kg
	Delonix regia	10.44 MJ/Kg
	Ficus benamina	11.21 MJ/Kg
	Licania tomentosa	14.67 MJ/Kg
	Nectandra megapotámica	15.51 MJ/ Kg
	Terminalia catappa	14.75 MJ/Kg
	Tipuana tipu	14.71 MJ/Kg
Mydlarz y Wieruszewski (2022)	Pino	7.44 GJ/m ³
	Abeto	7.08 GJ/m ³
	Haya	10.09 GJ/m ³
	Roble	10.09 GJ/m ³
	Abedul	9.03 GJ/m ³

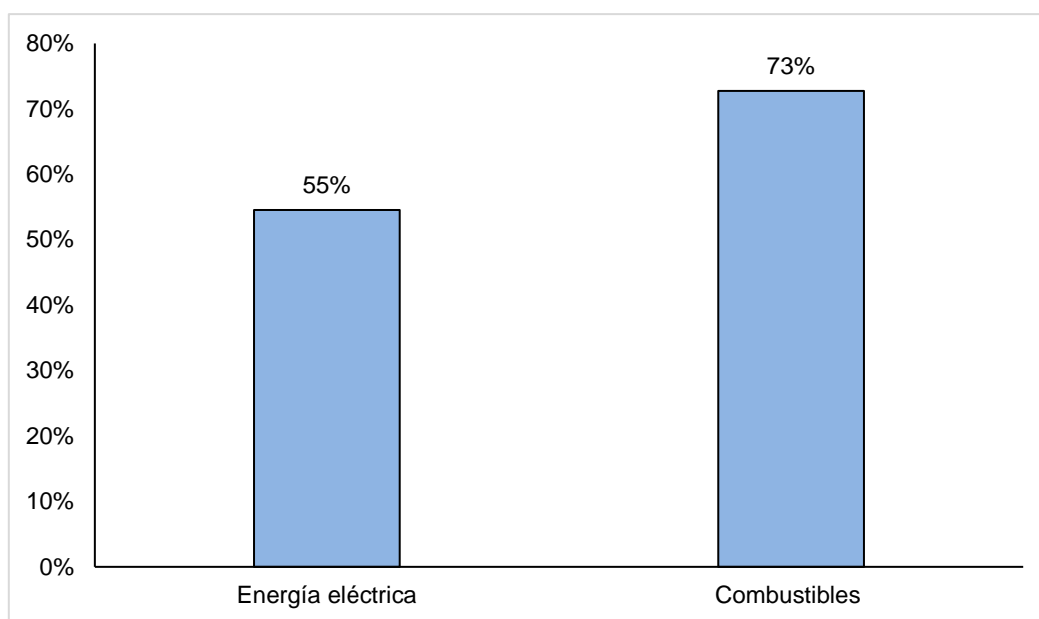
GJ= Gigajoules

Además, de los residuos plásticos, la madera, también puede ser empleada como medio de generación de energía. Tal como se muestra en la tabla 4, del análisis de siete especies forestales urbanas tropicales, se obtuvieron valores caloríficos superiores a 10 MJ/kg, en comparación con rangos de 16 a 53 MJ/kg y 19 a 22 MJ/kg para bosques tropicales y templados (Klingenberg et al., 2020). Mientras que, los residuos de madera provenientes de aserraderos, también contienen valores caloríficos entre 7 a 9 GJ/m³, lo que, demuestra la posibilidad de la implementación de este tipo de soluciones dentro de la industria de madera, como medio de reutilización de desechos (Mydlarz y Wieruszewski, 2022).

Del análisis se verifica que, para el caso de la madera, las propiedades físico químicas como el bajo contenido de agua y mayor densidad aparente son deseables para garantizar la generación de energía; las cuales difieren de las características de los plásticos, que se basan en el contenido de carbono fijo y la cantidad de cenizas emitidas.

IV.2. Tipos de energía generadas por el procesamiento de residuos sólidos urbanos

Figura 6. Resultado de los tipos de energía generados por los residuos sólidos municipales



En la figura 6, se muestra que, de los 11 artículos de investigación que mencionan los tipos de energía, el 73% estudia la capacidad de los residuos sólidos para generar combustibles como metano, gas de síntesis e incluso biocombustibles que mitigan los efectos de la contaminación ambiental. Por su parte el 55% de las investigaciones, establecen la facilidad de los residuos sólidos para generar energía eléctrica y atender las demandas de la población.

Tabla 5. *Producción de energía eléctrica de residuos sólidos*

Autor	Energía Eléctrica
Zahedi y Daneshgarb (2022)	19 Mw
Liang et al. (2022)	9.68E+8 kWh
Mozhiarasi et al. (2021)	118.07 Kwh/ ton.
Valentino et al (2018)	85.7 MWh/d
Yi, Jang y An (2018)	525 540 GJ/ton
Wang et al. (2018)	1.6 × 10 ⁹ kWh

Mw=Megawatts, Kwh=Kilowatts, Pj=Petajoule

En la tabla 5 se puede observar el potencial que poseen los residuos urbanos para la generación de electricidad. Se encontró que estos residuos, pueden generar un máximo de electricidad del 525, 540 GJ/ton, evidenciándose que la recuperación de energía por tonelada de desechos, es mayor que la generación de calor por vapor (2.34 GJ/tonelada) (Yi, Jang y An, 2018). Del mismo modo, se destaca que, la fracción orgánica de los residuos urbanos, es capaz de contribuir con la generación de electricidad, alcanzando los 85.7 MWh al día (Valentino et al., 2018). Mientras que, los residuos netamente alimentarios obtenidos en los mercados, pueden generar un total de 118,07 Kwh por cada tonelada procesada, atribuyendo esta capacidad a la cantidad de humedad (78.9 y 90.4%) y de carbono (38.66 ± 0.02) de las frutas y hortalizas (Mozhiarasi et al., 2021). En este punto, se pueden mencionar los avances de la empresa Petramás, en el Perú, la cual realiza el tratamiento de RSU obtenidos de un vertedero ubicado en Huaycoloro, para convertirlo en energía eléctrica. Esta planta produce alrededor de 28,294.80 Mw de energía por año como consecuencia de la incineración de los residuos (Programa Internacional de cooperación urbana, 2018).

La generación de energía eléctrica, es fundamental, no solo en el ámbito urbano, sino también en las industrias de producción. De esta manera, al aprovechar el calor residual de los RSU de los vertederos, se podrían generar 9.68E+8 kWh de electricidad, los cuales, pueden satisfacer las demandas de energía de los edificios urbanos, incluyendo los servicios de refrigeración y calefacción (Liang et al., 2022). Mientras que, en el ámbito industrial, los RSU, son

capaces de generar una potencia de 19 Mw, valores suficientes para lograr la operatividad de las maquinarias, logrando una potencia de turbina de 4.052 MW y una potencia de horno igual a 67,510,000 kJ/h (Zahedi y Daneshgarb, 2022).

La utilización de residuos urbanos en la producción de electricidad, se espera que reduzcan los GEI. De esta manera, diversas investigaciones, realizan un cálculo estimado de esta reducción. Los GEI, pueden pasar de 16, 061 t CO₂ equivalentes anuales a 33.47 t CO₂ equivalentes, siempre que, se mantenga la utilización de energías renovables a partir de los desechos (Yi, Jang y An, 2018). De la misma manera, con la incineración de RSU, esta reducción puede ser de 1.23 t CO₂ equivalente; sin embargo, está en función de la cantidad de residuos generados, por ende, mientras más residuos se incineren mayor será la energía, por ello, la cantidad de RSU afecta directamente los beneficios energéticos y ambientales futuros (Wang et al., 2018).

Tabla 6. Producción de combustibles a partir de residuos sólidos

Autor	Gas de síntesis	Metano	Biogás	Etanol	Biohidrógeno	Gas de vertedero
Mondal et al. (2022)	11 Mj/kg	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
Liang et al. (2022)	N.E	1.34E+10 kg	N.E	N.E	N.E	N.E
Ferreira et al. (2021)	704.3 kg/h	N.E	N.E	N.E	N.E	N.E
Mozhiasi et al. (2021)	N.E	169.36 m ³ /ton.	N.E	N.E	N.E	N.E
	N.E	200.36 m ³ /ton	N.E	N.E	N.E	N.E
Ebrahimian et al. (2020)	N.E	23,089 ml	N.E	98.3 g	71. 437 ml	N.E
Katinas et al. (2019)	N.E	N.E	7,943.87 m ³	N.E	N.E	N.E
Mahmoodi, Karimi y Taherzadeh (2018)	N.E	144.82 m ³	N.E	194 g.	N.E	N.E
Valentino et al. (2018)	N.E	N.E	8,080 m ³ /d	N.E	N.E	N.E
	N.E	N.E	28,410 m ³ /d	N.E	N.E	N.E
Yi, Jang y An (2018)	N.E	N.E	4,905,600 Nm ³ .	N.E	N.E	0.177 GJ/ton
Chan et al. (2018)	N. E	5,499,681.3 m ³ /año	10,184,595 m ³ / año	N.E	N.E	N.E

N.E= No especifica.

Del análisis realizado, se verifica que, la producción de energía eléctrica a través de residuos sólidos es factible y genera la potencia suficiente para atender la demanda energética de grandes ciudades y de las actividades industriales, e incluso es una alternativa para reducir las emisiones de gases del efecto invernadero, siempre y cuando el procesamiento de los RSU sea el adecuado, evitando la alta concentración de cenizas durante la incineración de residuos.

En la tabla 6, se observa que, los principales combustibles que se obtienen del procesamiento de los residuos urbanos, son el metano (CH₄) y el biogás. La producción de metano, puede ser utilizado como combustible de calderas y en tuberías de gas natural. La mayor parte del metano, se obtiene de los vertederos de residuos urbanos, a través de la captura de gas (Liang et al., 2022). Sin embargo, existen otros procesos que permiten la obtención de este gas, como la digestión anaeróbica de los sólidos residuales con adición de hidrólisis enzimática, que lograron una producción de 23.1 litros de biometano (Ebrahimian et al., 2020).

Además, se identificaron procesos previos a la producción de metano, como la pasteurización, que logra aumentar la cantidad de metano, alcanzando un total de 169.36 m³ por tonelada de residuos. Por otra parte, un pretratamiento de extrusión logró un incremento de 200.36 m³ de metano. Esto demuestra que, un pretratamiento de los residuos junto con la co-digestión anaeróbica mejora la capacidad de reducción de residuos e incrementa los potenciales de metano y la eliminación de patógenos (Mozhiarasi et al., 2021).

Por otro lado, otro de los combustibles generados a partir de RSU es el biogás, el cual, se obtiene a través del proceso de digestión anaeróbica. Por lo general, para la obtención de biogás, la fracción orgánica de los residuos resulta eficaz, de esta manera se puede lograr un total de 8,080 m³ de biogás por día (Valentino et al., 2018). De la misma manera, los residuos de alimentos, obtienen un potencial de 4,905,600 Nm³ de biogás por año (Yi, Jang y An, 2018); mientras que, los residuos biodegradables alcanzan una producción de 7,943.87 m³ de biogás. Se puede observar que los residuos orgánicos son una buena alternativa para la producción de este gas, debido a su alto contenido de humedad. Por lo general, se obtiene a través del método de gasificación por vapor y puede alcanzar una eficiencia energética del 92% (Mondal et al., 2022). Además, al igual que el

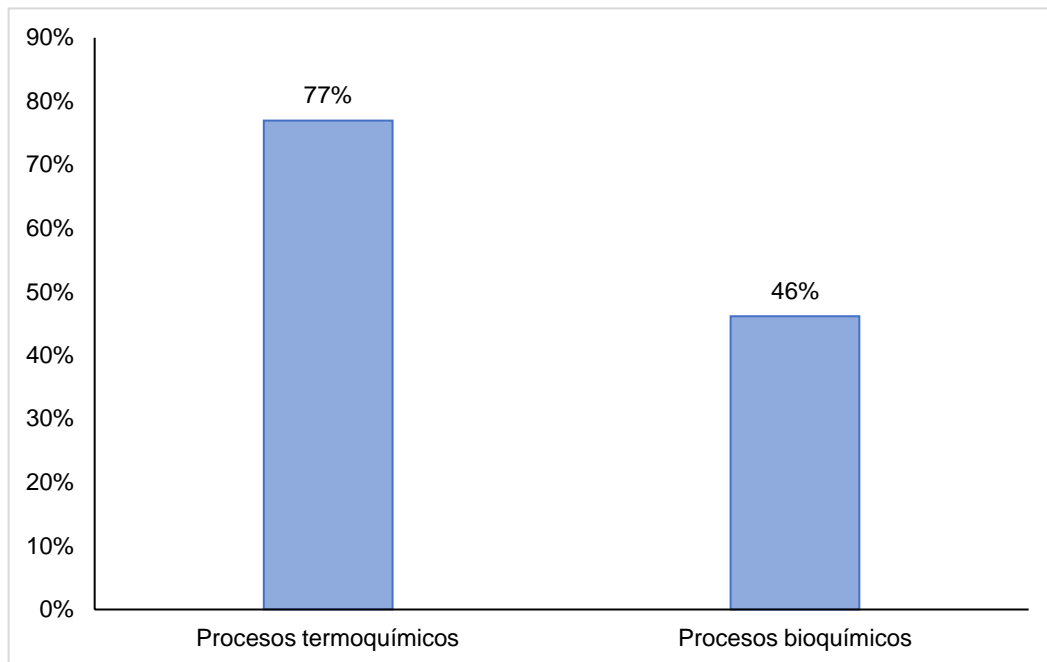
biogás, es capaz de reducir las emisiones de gases del efecto invernadero e incluso lograr que se ubiquen debajo de las establecidas en Estados Unidos y Brasil. (Ferreira et al., 2021).

Otras investigaciones lograron obtener etanol con el tratamiento de lo RSU. El proceso de hidrólisis enzimática a partir de la digestión anaeróbica, puede generar un total de 98.3 g de etanol, logrando una cantidad de energía de 8,236.9 kJ (Ebrahimian et al., 2020). Además, se identificó que, para el procesamiento de etanol, se requieren diferentes azúcares e inhibidores, los cuales, se someten a un proceso de fermentación utilizando una cepa de hongos. De este modo, la cepa conocida como Zygomycetes, se presenta como una buena alternativa, al ser altamente tolerante a los inhibidores, logrando un rendimiento de etanol de 194 g (Mahmoodi, Karimi y Taherzadeh, 2018).

Se puede observar que, los estudios revisados, establecen que el procesamiento de residuos urbanos, se utiliza en mayor proporción para la obtención de metano y biogás, siendo, este último una alternativa ideal para la sustitución de los combustibles fósiles en el sector transporte. Por otro lado, se encontró que en la digestión anaeróbica el pretratamiento de los residuos resulta importante para mejorar su potencial energético y eliminar los patógenos propios de los residuos.

IV.3. Tecnologías de recuperación de energía de los sólidos urbanos

Figura 7. Resultado de las tecnologías de conversión de residuos sólidos



La conversión de energía de los desechos se desarrolla con la ayuda de diferentes técnicas que logran que los RSU produzcan calor, electricidad y otros subproductos de forma libre de riesgos y respetuosa con el medio ambiente. En la figura 7, se observa que, el 77% de los estudios emplean procesos termoquímicos para la conversión, que incluyen la incineración, la gasificación y la pirólisis; mientras que, un 46% de los artículos, utilizan procesos bioquímicos como la digestión anaeróbica y la captura de gas directa de los vertederos, la cual es considerada como una técnica menos avanzada en comparación con las demás.

Tabla 7. Viabilidad de los procesos termoquímicos de recuperación de energía

Tipo de tecnología	Inversión	Costos	Ingresos	VAN	TIR	Autor	
Procesos termoquímicos	0.22 millones USD	2.19 millones USD	3.33 millones USD	N.E	N.E	Alayi y Rouhi (2020)	
	54.319 millones de USD	5562.06 de USD	6.32 millones de USD	26.056 millones USD	N.E	Dos Santos et al. (2019)	
	Incineración		650 millones USD	5,440 millones	N.E	N.E	Yong et al. (2019)
		322.245 millones de USD	521.880 millones de USD	N.E	386.715 millones de USD	N.E	Panepinto y Zanetti (2018)
		76.6 Millones de USD	279.4 millones de USD	45.2.	8.85%	Fei et al. (2018)	
		355.89	38.64 millones			Sun et al. (2022)	
		N.E	millones de USD	de USD	N.E	N.E	
					656.388		
	Gasificación	N.E	N.E	N.E	millones de USD	15.13%	
					210.261		Mbalane y Oboirien (2020)
	N.E	N.E	N.E	millones de USD	18.49%		
	N.E	158.4 millones de USD	189.2 millones de USD	-209.4.	1.35%	Fei et al. (2018)	

	N.E	N.E	494.36	33.64 millones	N.E	
				de euros		Haeldermans et al. (2020)
Pirólisis	N.E	N.E	594.67	26.52 millones de euros	N.E	
	6.23 millones euros	N.E	N.E	N.E	-7.20%	Yang et al. (2018)

Tabla 8. Viabilidad de los procesos bioquímicos de recuperación de energía

Tipo de tecnología	Inversión	Costos	Ingresos	VAN	TIR	Autor
Captura de gas de vertedero	N.E	N.E	0.04 dólares por habitante	N.E	11.61%	Padilha y Mesquita (2022)
	N.E	355.99 USD	N.E	N.E	N.E	Sun et al. (2022)
	10.356 millones USD.	3450 USD	2.27 millones.	0.583 millones	N.E	Dos Santos et al. (2019)
Procesos bioquímicos	N.E	N.E	0.33 dolares por habitante.	N.E	11.61%	Padilha y Mesquita (2022)
	N.E	N.E	N.E	298.998 millones	17.03%.	Mbalane y Oboirien (2020)
	12.05 millones	4200.49	1.85.	-5.14 millones	N.E	Dos Santos et al. (2019)
	2,600 millones	N.E	N.E	550,900	10.30%	Zeng et al. (2018)

Con respecto a los procesos termoquímicos de recuperación de energía, en la tabla 7, se muestra que la incineración es la técnica más utilizada en la mayor parte de los estudios, ya que, la implementación de plantas de incineración de residuos, resultan viable de manera económica y financiera, obteniendo valores actuales netos (VAN) positivos, periodos de recuperación estables y beneficios económicos que vuelven atractivos estos proyectos.

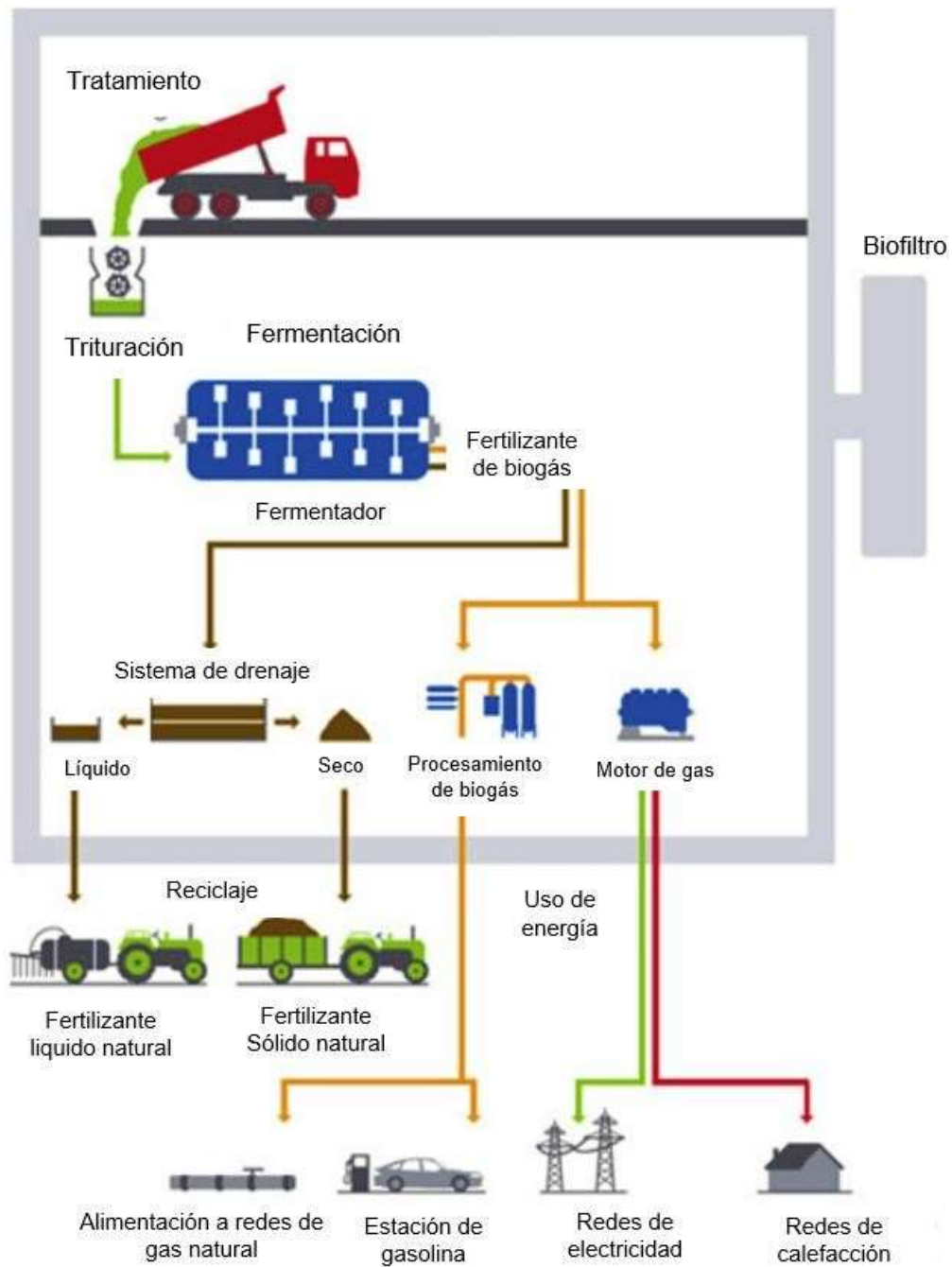
Los residuos sólidos urbanos (RSU) se tratan principalmente a través de vertederos e incineración en la mayoría de los países. Dado que la eficacia de la clasificación de residuos en el punto de origen no siempre se puede garantizar, especialmente en los países en desarrollo, la introducción de sistemas de tratamiento mecánico-biológico (MBT) es una posible solución, ya que MBT puede separar la fracción biodegradable y recuperar los materiales reciclables de los flujos de residuos mixtos (Fei et al., 2018).

Una planta incineradora de residuos es una solución definitiva para la disposición sanitaria de los residuos, sobre todo, para zonas que no cuentan con suficientes espacios para la disposición en vertederos. Además, resulta eficiente para el procesamiento de los residuos urbanos que tienen un poder calorífico relativamente bajo para la producción de energía, siendo el caso de los residuos alimentarios. Si hay un diseño para recuperar energía, es mejor quemar los residuos o separar o precalentar los residuos para reducir su humedad. Sin embargo, se debe considerar que, un incinerador requiere un costo mayor que una caldera quemadora (Alayi y Rouhi, 2020).

En contraposición a lo anterior, otros estudios muestran que, la incineración no resulta eficiente si se realiza a pequeña escala, ya que, a pesar de realizarse con desechos alimentarios con alto contenido de humedad, requiere enormes costos de capital, principalmente ante la necesidad de tecnologías avanzadas de control de la contaminación del aire para filtrar los gases de combustión complejos y peligrosos de las plantas incineradoras. En las naciones europeas, aproximadamente dos tercios del costo de capital se gastan en sistemas y dispositivos de control de la contaminación del aire. Esto deja un conflicto de dilemas entre el beneficio económico y la sostenibilidad ambiental, ya que los

sistemas de conversión de residuos más eficientes, desde el punto de vista ambiental pueden no ser siempre los más prudentes desde el punto de vista financiero (Yong et al., 2019).

Figura 8. *Proceso de digestión anaeróbica para la obtención de biogás*



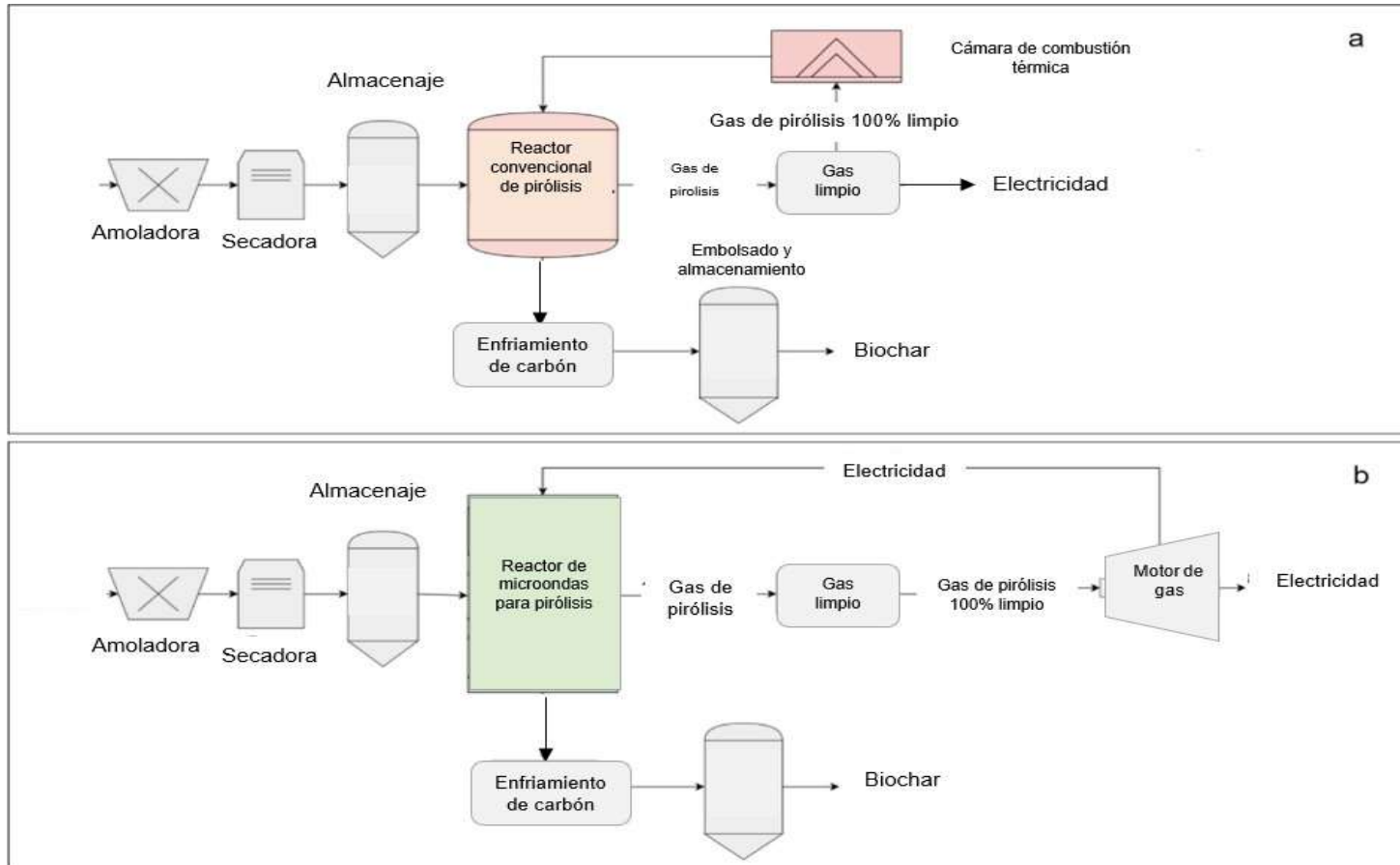
Fuente: Tomado de Dos Santos et al. (2019)

Con respecto a los procesos bioquímicos, la digestión anaeróbica, a pesar de su VAN negativo, se considera el escenario ambientalmente más viable. Esta tecnología que se presenta no contribuye al calentamiento global ni al agotamiento de la capa de ozono. Además de no generar malos olores, moscas, roedores y utilizar un área menor, se puede realizar a menor escala. En la figura 8, se visualiza el procedimiento para el tratamiento de los RSU a través de esta tecnología

Las plantas de digestión anaeróbica requieren una recogida selectiva o pre cribado de materiales, permitiendo así el reciclaje de materiales inorgánicos como plástico, papel, cartón y aluminio. Por lo tanto, el costo de esta tecnología se eleva por la necesidad de separar y triturar los residuos. Suponiendo que los municipios cuenten con programas efectivos de recolección selectiva, el proceso de digestión anaeróbica se vuelve más fácil y económico. Esto, a su vez, reduce el costo de la inversión, quizás haciendo que el proyecto sea económicamente viable. Por ello, es que, se apuesta por un escenario combinado, con digestión anaeróbica e incineración, el cual, resultó ser menos costoso que el uso de incineradores (los costos de inversión fueron un 44% más bajos y el LCOE un 5,7 % más bajo). Sin embargo, la producción de energía fue considerablemente mayor que en los rellenos sanitarios y digestores anaeróbicos (Dos Santos et al., 2019).

Por otro lado, existen otros procesos, como la gasificación que se desarrolla en diferentes tipos, como gasificación por plasma, que es una aplicación que consume mucha energía y tiene un costo de inversión relativamente más alto, se puede construir como un sistema grande (hasta varios sistemas de 1000 MW), lo que también puede hacerlo económicamente competitivo. Otras tecnologías como el gasificador de lecho fluidizado, el gasificador de lecho fijo también tienen una buena eficiencia energética (547–571 kWh/tonelada), sin embargo, contribuyen a una mayor cantidad de CO₂ emisiones. Teniendo en cuenta la gestión general de residuos, se encontró que la tecnología de gasificación es beneficiosa para la economía, el medio ambiente y la extracción de energía en comparación con la opción de vertedero (Sun et al., 2022).

Figura 9. Comparación entre pirólisis convencional (a) y pirólisis de microondas (b)



Nota. Tomado de Haeldermans et al. (2020).

Por otro lado, existe el procedimiento de pirólisis, que se emplea para obtener biochar o biocarbón. Tal como se muestra en la figura 9, existen tipos de pirólisis que se diferencian, según los procesos de reactor utilizados. En el caso de la pirólisis empelando un reactor de microondas presenta como ventajas la transferencia de calor uniforme, tiene un gran rendimiento y es menos dependiente del tamaño de la biomasa en comparación del pirólisis convencional. Sin embargo, si requiere de mayor electricidad y de un control de flujo másico difícil (Haeldermans et al., 2020).

Se puede concluir que, a pesar de que la incineración es la más empleada, es preferible usar técnicas como la gasificación y la pirólisis, en lugar de la quema masiva para tratar desechos mixtos o inorgánicos. Los procesos de pirólisis y gasificación generan varios combustibles secundarios útiles y, al mismo tiempo, calor y energía, que pueden convertirse en electricidad al hacer reaccionar fracciones de materia orgánica de los RSU a alta temperatura (Haeldermans et al., 2020). Ambos procesos tratan los RSU sin combustión directa con un control preciso de la cantidad de oxígeno y vapor que ingresa al sistema. El gas de síntesis se produce al principio en ambos procesos en los que se eliminan los contaminantes antes de quemarse, lo que da como resultado un nivel de emisión más limpio. La recuperación de energía de los RSU a través de la gasificación y la pirólisis produce emisiones más limpias en comparación con la incineración y no presenta ninguna amenaza para la salud pública (Yong et al., 2019).

En ese sentido, para maximizar el potencial energético de los RSU y, al mismo tiempo, ahorrar costos de construcción de una instalación para segregar los RSU, tanto el gobierno como las autoridades locales deben educar e implementar una segregación efectiva y práctica en fuentes domésticas y comerciales para separar los desechos orgánicos. y residuos inorgánicos para procesos de tratamiento de residuos. Los residuos orgánicos pueden tratarse mediante el proceso biológico de digestión anaeróbica para recuperar tanto la electricidad como los residuos orgánicos, mientras que los residuos inorgánicos pueden tratarse térmicamente mediante pirólisis y gasificación para recuperar energía y combustible secundario y otros productos (Mbalane y Oboirien, 2020).

Del análisis se infiere que, existen diferentes tecnologías para la conversión de residuos en energía; sin embargo, la digestión anaeróbica, gasificación y pirólisis, son las más viables económica y ambientalmente, puesto que no requieren de costos elevados de implementación en comparación con la incineración y eliminan los contaminantes antes de quemarse, dando como resultado una emisión más limpia que limita la contaminación ambiental.

V. CONCLUSIONES

- El 93% de los artículos emplean residuos orgánicos para generar energía, ya que, la fracción orgánica de los residuos resulta eficiente mientras más alto sea su contenido de humedad o de carbono, sobre todo para el proceso de captación de gases como el metano. Por su parte, el 75% emplea residuos inorgánicos, siendo los residuos plásticos y el papel los más utilizados debido a su eficiencia energética, sobre todo a su alto contenido de carbono fijo y a la poca cantidad de cenizas emitidas.
- El 77% de los estudios revisa la capacidad de los residuos urbanos para generar combustibles, obteniendo principalmente metano y biogás, siendo, este último una alternativa ideal para la sustitución de los combustibles fósiles en el sector transporte. En los procesos de obtención de biogás a partir de digestión anaeróbica, el pretratamiento de los residuos resulta importante para mejorar su potencial energético y eliminar con facilidad los patógenos propios de los residuos, dando como resultado un combustible más limpio.
- Existen diferentes tecnologías para la conversión de residuos en energía, obteniendo que el 77% de los estudios se basan en procesos termoquímicos, siendo la incineración las más utilizada; sin embargo, la digestión anaeróbica, gasificación y pirólisis, son las mejores alternativas al resultar viables económica y ambientalmente, puesto que, no requieren de costos elevados de implementación en comparación con la incineración y eliminan los contaminantes antes de quemarse, dando como resultado una emisión más limpia que reduce la contaminación ambiental.
- La generación de energía a partir de residuos es factible y es una buena alternativa para reutilizar desechos que se consideran no reutilizables como los desechos orgánicos y contribuir con la reducción de las emisiones de gases del efecto invernadero. Además, la producción de energía eléctrica, a través de residuos sólidos genera la potencia suficiente para atender la demanda energética de grandes ciudades y de las actividades industriales, con valores que oscilan entre 9.68 Kwh y los 85.7 MWh.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los gobiernos nacionales evaluar la implementación plantas de producción de biogás, con el fin de atender dos problemas urgentes, por un lado, la mejora del tratamiento de los residuos sólidos considerando que estos proyectos resultan rentables; y por el otro, la obtención de un combustible que puede ser empelado en el sector de transporte y reducir el nivel de contaminación del aire.

- La comunidad científica, debe profundizar el estudio de la recuperación de energía de los residuos sólidos, con el fin de encontrar nuevos métodos y tecnologías de conversión que mejoren los procesos y tratamientos que se emplean actualmente y logren la eficiencia económica y ambiental, esto, permitiría que se vuelvan redituables y atractivos para la inversión privada.

- Los gobiernos regionales y municipales deben mejorar el proceso de recolección, separación y disposición de residuos urbanos que desechan en los vertederos, los cuales representan un foco de contaminación. Para ello, se debe destinar parte del presupuesto en proyectos de mejora de la infraestructura de los vertederos actuales y buscar alianzas estratégicas con el sector privado para el aprovechamiento de los residuos orgánicos que son lo que generan mayor contaminación al resultar inutilizables para otros fines.

- Se recomienda a la comunidad científica, ahondar el estudio sobre la evaluación del ciclo de vida de la energía que se produce a partir de materias primas, pues es un punto que apenas se está profundizando y es necesario para obtener ventajas en el proceso de comercialización de los biocombustibles obtenidos.

REFERENCIAS

- ABBASI, S. The myth and the reality of energy recovery from municipal solid waste. *Energy Sustainability and Society*. 2018. 8, 36: 1-15.
- ALAYI, Reza y ROUHI, Hamed. Techno-Economic Analysis of Electrical Energy Generation from Urban Waste in Hamadan, Iran. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2020.15, 3: 337-341.
- AN evaluation of the potential of waste to energy technologies for residual solid waste in New South Wales, Australia por Dastjerdi, B. [et al]. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2019, 115.
- ANNEPU, Ranjith. *Sustainable Solid Waste Management in India*. Columbia Uiniversity. s.l. : Department of Earth and Environmental Engineering, 2012.
- ASSESSMENT of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India por GHOSH, Pooja [et al]. *Bioresource Techonology*. 2018, 272: 1-17.
- AYODOLE, T, OGUNJUYIGBE, A y ALAO, M. Life cycle assessment of waste- to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria. *Applied Energy*, 2017. 201: 200-218.
- BIOCONVERSION of municipal solid waste into bio-based products: A review on valorisation and sustainable approach for circular bioeconomy por Yaashikaa [et al]. *Science of the total enviroment*. 2020, 748: 1-12.
- CAMPOS, José. *Investigación Cualitativa: El Sempiterno Desequilibrio entre Tendencias Generalizadoras y Particularizadoras en la explicación de la realidad..* EDUCADI. 2018. 3, 2: 62-67.
- CHARACTERIZATION of solid waste of restaurant and its energy generation potential: case study of Niterói, RJ, Brazil por Alfonso Azevedo [et al]. *Biomass Conversion and Biorefinary*. 2020, 12: 2477–2486.
- CHEN, Ying. Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology. *Journal of cleaner production*. 2018. 192: 262-269. CIRCULAR economy and waste to energy

por Rada [et al]. Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and sustainability. 2020.

CONVERSION of refuse derived fuel from municipal solid waste into valuable chemicals using advanced thermo-chemical process por Bhatt, Mukesh [et al]. Journal of cleaner production. 2021, 20, 329.

DLAMINI, Smangele, SIMATELE, Mulala y KUBANZA, Nzalalemba. Municipal solid waste management in South Africa: from waste to energy recovery through waste-to-energy technologies in Johannesburg. Local Environment. 2018. 24, 3: 249-257.

ENERGY potential of wood waste from a tropical urban forest por Klingenberg, Debora [et al]. Research Society and Development. 2020. 9.

ENERGY recovery potential and environmental impact of gasification for municipal solid waste por vaish, barkha [et al]. Biofuels 2019. 10: 87-100.

ENVIRONMENTAL aspects of converting municipal solid waste into energy as part of composite fuels por Glushkov, Dimitrii. Journal of Cleaner Production. 2018. 201: 1029-1042.

ESTIMATION of Methane Production and Electrical Energy Generation from Municipal Solid Waste Disposal Sites in Pakistan por Sohoo, Ihsanullah [et al]. 2021. Energies. 2021. 14, 9: 1-17.

ESPINOZA, Eudaldo. La investigación cualitativa, una herramienta ética en el ámbito pedagógico. Conrado Machala, Ecuador : s.n., 2020. 16, 75: 103-110.

EXPERIMENTAL study on the energy conversion of food waste via supercritical water gasification: Improvement of hydrogen production por Yan, Mi, [et al]. 2019. 44, 20: 4664-4673

FROM municipal solid waste (MSW) to hydrogen: Performance optimization of a fixed bed gasifier using Box-Benkhen method por Mondal, Pradip. International Journal of Hydrogen Energy. 2022. 47, 46: 20064-20075.

RUDRA, Souman y KIFLE, Yohannes. Future district heating plant integrated with municipal solid waste (MSW) gasification for hydrogen production. Energy. 2019. 180: 881-892.

GENERATING electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis por Dos Santos, Rafaela [et al]. Journal of environmental management. 2019. 231: 198-206.

HOCKENOS, Paul. 2021. Waste to Energy – Controversial power generation by incineration. Journalism for the energy transition. [En línea] 26 de mayo de 2021. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/waste-energy-controversial-power-generation-incineration>.

HYDROGEN and syngas production from municipal solid waste (MSW) gasification via reusing CO₂ por Zheng, Xiaoyuan [et al]. Applied Thermal Engineering. 2018. 144: 242-247.

INCINERATION of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential por Da Silva, Leo [et al]. Renewable Energy 2019. 149: 1386-1394.

INCREASING Access to Electricity: An Assessment of the Energy and Power Generation Potential from Biomass Waste Residues in Tanzania por Aslam, Zahida [et al]. Energies. 2021. 14, 6: 1-22.

INFUENCE of pre-treatments and anaerobic co-digestion of slaughterhouse waste with vegetable, fruit and fower market wastes for enhanced methane production por Mozhiarasi, Velusamy [et al]. Biomass Conversion and Biorefinery. 2021.,1-18.

INHERENT roadmap of conversion of plastic waste into energy and its life.

SHARMA por Bhasha [et al]. Renewable and Sustainable energy. 2021. 146: 1-17.

- ISLAM, K. Municipal solid waste to energy generation: An approach for enhancing climate co-benefits in the urban areas of Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. 81, 2: 2472-2486.
- KAZA, Silpa y BHADA-TATA, Perinaz. 2018. *Decision Maker's Guides for Solid Waste Management Technologies*. Urban Development Series Knowledge Papers.s.l. : World Bank, 2018.
- KAZA, Silpa, y otros. 2018. *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. s.l. : Urban Development, 2018.
- MINATTA, Alejandro y BASANI, Marcelo. 2020. *Innovation in Water, Sanitation, and Solid Waste: Assessment, Perspectives, and Opportunities for Latin America and the Caribbean*. s.l. : BID, 2020.
- MUNICIPAL solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies por Moya, Diego [et al]. *Energy Procedia*. 2017. 134: 286-295.
- MUNICIPAL solid waste incineration in a packed bed: A comprehensive modeling study with experimental validation por Gu, Tianbao [et al]. *Applied Energy*. 2019. 247: 127-139.
- MUNICIPAL solid waste sampling, quantification and seasonal characterization for power evaluation: Energy potential and statistical modelling por Ibikunle, R. [et al]. 2020. Nigeria : s.n., 2020, *Fuel*. 277: 1-12.
- MUNICIPAL solid waste: A potential source of clean energy for Khartoum State in Sudan por Farouk, Hazir [et al]. 2022. *Energy Reports*. 8: 342-349.
- MYDLARZ, Katarzyna y WIERUSZEWSKI, Marek. Economic. Technological as Well as Environmental and Social Aspects of Local Use of Wood By-Products Generated in Sawmills for Energy Purposes. *Energies*. 2022. 15, 4.
- NANDA, Sonil y BERRUTI, Franco. Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2020. 19: 1433– 1456 .

- OPTIMAL processing route for the utilization and conversion of municipal solid waste into energy and valuable products por Rizwan, Muhammadn [et al]. Journal of cleaner production. 2018. 174: 857-867.
- ORGANIC Fraction of Municipal Solid Waste Recovery by Conversion into Added-Value Polyhydroxyalkanoates and Biogas por Valentino, Francesco [et al] Sustainable Chemistry & Engineering. 2018. 6: 16375-16385.
- ROBUST microorganisms for biofuel and chemical production from municipal solid waste por DORNAU, Aritha [et al]. Microbial Cell Factories. 2020. 19: 1-18.
- ZAHEDI, Rahim y DANESHGAR, Sareh. Simulation and optimization of electricity generation by waste to energy unit in Tehran. Sustainable energy technologies and assessments. 2022. 53.
- STATUS, characterization, and potential utilization of municipal solid waste as renewable energy source: Lahore case study in Pakistán por Azam, Mudassar [et al]. Environmental International. 2020.134.
- HARAGUCHI, Masahiko, SIDDIQI, Afreen y NARAYANAMURTI, Venkatesh. Stochastic cost-benefit analysis of urban waste-to-energy systems. Journal of cleaner production. 2019. 224: 751-765.
- SUSTAINABLE Waste Management Through Waste to Energy Technologies in India- Opportunities and Environmental Impacts. KUMAR, Charles. International Journal of renewable energy research.2019. 9, 1: 309-342.
- TOWARDS Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinion por QAZI, Atika [et al] 2019. 7: 63837- 63851.
- TRACY, Sara. Calidad cualitativa: ocho pilares para una investigación cualitativa de calidad. Mágenes. Revista de la Universidad de Málaga. 2021, 2:173-201.
- UNCOVERING regional energy and environmental benefits of urban waste utilization: A physical input-output analysis for a city case. WANG, Hanning, y otros. 2018. 2018, Journal of cleaner production, Vol. 189, págs. 922-932.

- URBAN bio-waste as a flexible source of electricity in a fully renewable energy system. LEEUWEN, Lotta, CAPPON, Hans y KEESMAN, Karel. 2021. 2021, Biomass and Bioenergy, 145.
- URBAN waste to energy recovery assessment simulations for developing countries. SIDDIQI, Afreen, HARAGUCHI, Masahiko y NARAYANAMURTI, Venakatesh. 2020, World Development, 131: 1-11.
- USE of Onion Waste as Fuel for the Generation of Bioelectricity. ROJAS, Segundo, y otros. 2022, Molecules. 27, 3: 1-14.
- VALIZADEH, Jaber, MOZAFARI, Peyman y HAFEZALKOTOB, Ashkan.
- Municipal waste management and electrical energy generation from solid waste: a mathematical programming approach.. Journal of Modelling in Management. 2022. 17, 1: 309-340.
- WASTE to energy Incineration: Evaluation of energy potential for urban domestic waste in Guayaquil. HIDALGO, J., y otros. 2019, Iberian Journal of information systems and technology. 392-403.
- WASTE-TO-ENERGY Technologies Towards Circular Economy: a Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis. BOLOY, Ronney, y otros. 2021, Water, Air & Soil Pollution, 232, 306,: 1-25.
- XIN Xiaodong, MA, Yingqun y LIU, Yu. Electric energy production from food waste: Microbial fuel cells versus anaerobic digestion. Bioresource Technology. 2018. 255: 281-287.
- YI, Sora, JANG, Yong y AN, Alicia. Potential for energy recovery and greenhouse gas reduction through waste-to-energy technologies. Journal of cleaner production. 2018. 176: 1-32.

Anexo 2. Artículos utilizados en la investigación

Anexo 2.1. Artículos relacionados con los tipos de residuos sólidos urbanos empleados para generar energía

AUTOR	TITULO	OBJETIVO	RESIDUOS ORGANICOS	RESIDUOS INORGANICOS
Mydlarz y Wieruszewski (2022)	Economic, Technological as well as Environmental and Social aspects of Local use of Wood By-products Generated in Sawmills for Energy Purposes	Especificar los aspectos económicos, tecnológicos, ambientales y sociales del uso local de subproductos de la madera generados en aserraderos con fines energéticos	No especifica	Madera valor calorífico: Pino = 7.44 GJ/m ³ . Abeto= 7.08. Haya = 10.09. Roble =10.09. Abedul=9.03.
Adeboye et al. (2022)	Characterization and energy potential of municipal solid waste in Osogbo metropolis	Investigó la composición física y el volumen de los residuos sólidos municipales en el vertedero central, Egbedi, metrópolis de Osogbo.	Residuos orgánicos. Valor calorífico superior= 21, 582.8 Kj/Kg. Valor calorífico inferior=21, 580.1 Kj/Kg	No especifica
Sohoo et al. (2021)	Estimation of methane production and electrical energy generation from municipal Solid Waste disposal Sites in Pakistán	Estimar la producción anual de metano de los sitios de eliminación de residuos sólidos municipales en Pakistán y su potencial de generación de energía eléctrica	Potencial energético al 50% = 124.7 Mwh. Potencial energético al 75% = 187.1 Mwh	
Sayadiha et al. (2021)	Waste-to-energy Potential Using Municipal Solid Waste as One Implementation of Jakarta Smart City	Encontrar energía eléctrica potencial que se pueda producir a partir de la tecnología de conversión de residuos en energía (WTE) de IWMS (sitio de gestión integrada de residuos) Bantargebang (Bekasi),	Residuos de alimentos = 1,437.86 Kcal/Kg	Plásticos= 1,038.32 Kcal/Kg Papel = 2,884.84 Kcal/Kg Madera = 906.08 Kcal/Kg

Ilmas et al. (2021)	Characterization and energy potential evaluation of urban municipal solid waste of Pakistan	Determinar las características físicas y químicas básicas de los RSU urbanos de dos megaciudades paquistaníes (Lahore y Rawalpindi).	Potencial energético: Vertedero 1= 6,213 Mwh. Vertedero 2= 40,897 Mwh. Valor calorífico superior: Vertedero 1= 19.7 Mj/Kg. Vertedero 2= 17.4 Mj/Kg Valor calorífico inferior: Vertedero 1 = 15.7 Mj/Kg. Vertedero 2= 15.60 Mj/Kg	
Aslam et al. (2021)	Increasing Access to Electricity: An Assessment of the Energy and Power Generation Potential from Biomass Waste Residues in Tanzania	Evaluar si los residuos de biomasa residual en Tanzania tienen suficiente potencial energético para producir energía eléctrica renovable a pequeña escala utilizando generadores diésel fuera de la red junto con digestión anaeróbica (DA) y/o gasificación.	Potencial energético de residuos municipales = 463 Gwh	
Azevedo et al. (2020)	Characterization of solid waste of restaurant and its energy generation potential: case study of Niterói, RJ, Brazil	Caracterizar los residuos sólidos generados en una unidad de alimentación y nutrición, ubicada en el municipio de Niterói	Residuos orgánicos con un potencial de generación de energía de 266, 492.16 kWh al año	No especifica
Klingenberg et al. (2020)	Energy potential of wood waste from a tropical urban forest Potencial energético de los residuos de madera de un bosque tropical urbano	Determinar el potencial de producción de energía de siete especies más utilizadas en la silvicultura urbana en el estado de São Paulo, Brasil, al evaluar las características físicas, químicas y energéticas de los residuos de madera	No especifica	Madera <hr/> Cenosisigma pluviosum: Poder calorífico bruto: 15.14Mj/Kg <hr/> Delonix regia: Poder calorífico=10.44 MJ/Kg <hr/> Ficus benjamina: Poder calorífico = 11.21 MJ/Kg

				Licania tomentosa: Poder calorífico = 14.67 MJ/Kg
				Nectandra megapotamica: 15.51 MJ/ Kg
				Terminalia catappa: 14.75 MJ/Kg
				Tipuana tipu: 14.71 MJ/Kg
Ibinkule et al. (2020)	Municipal solid waste sampling, quantification and seasonal characterization for power evaluation: Energy potential and statistical modelling	Caracterización de los campos de residuos sólidos en Llorin para evaluar el potencial energético	Residuos de comida. Valor calorífico: 3.46 MJ/Kg. Potencial energético= 141,247 Kw	Madera: Valor calorífico (HV) =0.22 MJ/Kg. Potencial energético (EP) = 9,078 Kwh Papel: HV=1.19 MJ/Kg. EP= 48, 638 Kwh Cajas. HV= 2.58 MJ/ Kg. EP=105,298 Kwh Botellas de plástico. HV= 5.48 MJ/Kg. EP=223,962 Kw
Rudra y Tesfagaber (2019)	Future district heating plant integrated with municipal solid waste (MSW) gasification for hydrogen production	Caracterización de los RSU noruegos para el cálculo del poder calorífico.	No especifica	Combinación de papel, cartón, madera y plástico. Poder calorífico=21.8 MJ/Kg
Hidalgo et al. (2019)	Waste-To-Energy Incineration: Evaluation of energy potential for urban domestic waste in Guayaquil	Determinar la composición, tasa de producción y valor calorífico teórico de los residuos domésticos.	Residuos orgánicos. Valor calorífico superior (HHV)=19.17 MJ/Kg. Valor calorífico inferior (LHV) = 3.03 MJ/Kg	Plásticos: HHV=30.98 MJ/Kg. LHV=29.13 MJ/Kg Vidrio: HHV=31.84 MJ/Kg. LHV=28.79 MJ/Kg Papel y cartón: HHV=19.72 MJ/Kg. LHV=16.54 MJ/Kg Metal: HHV=27.81 MJ/Kg. LHV=25.93 MJ/Kg

Siddiqi et al. (2019)	Evaluation of Municipal Solid Wastes Based Energy Potential in Urban Pakistan	Evaluación del potencial energético que proporcionan los residuos para la generación de energía mediante el proceso de incineración. Se propone una planta de generación de energía sustentable basada en el ciclo Rankine	Desechos alimentarios = 15 MJ/Kg	Plástico: Valor calorífico = 45 MJ/Kg Papel: VC = 16 MJ/Kg Madera = 19 Mj/Kg
Gosh et al. (2018)	Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India	Se utilizó el método predeterminado (DM) del IPCC, el decaimiento de primer orden (FOD) y LandGEM para estimar el potencial de energía y emisión de metano de los vertederos Delhi-Okhla, Bhalswa y Ghazipur.	Residuos de vertederos: Potencial energético= 9.86×10^8 MJ Potencial energético= 4.06×10^8 MJ Potencial energético = 8.11×10^8 MJ	
Chen (2018)	Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology	Examinó el potencial de recuperación de energía y el alcance de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de los RSU y los ISW (residuos industriales)	Residuos alimenticios: Hv= 4.095.50 KJ/KG	Papel: Valor calorífico =12,105.83 KJ/Kg Plásticos: HV=19,105.83 KJ/Kg Metales: HV= 702.66 KJ/Kg Vidrio: HV=140.53 KJ/Kg.
Taspinar y Uslu (2018)	Evaluation of combustibility and energy potential of municipal solid waste: The case of Esenler Municipality	Se caracterizan los residuos sólidos producidos en el Municipio de Esenler	Valor calorífico inferior= 1,711 Kcal/Kg. Valor calorífico superior = 3,498 Kcal/Kg	

Anexo 2.2. Artículos relacionados con los tipos de energía generados por el procesamiento de residuos urbanos

AUTOR	TITULO	OBJETIVO	ENERGIA ELECTRICA	ENERGÍA CALORÍFICA	BIOCOMBUSTIBLES
Mondal et al. (2022)	De residuos sólidos urbanos (RSU) a hidrógeno: optimización del rendimiento de un gasificador de lecho fijo utilizando el método Box-Benkhen	Desarrollar el modelo de un gasificador de lecho fijo considerando el método de gasificación por vapor para la producción de H2 ricogas de síntesis de RSU.	No específica	No específica	Gas de síntesis = 11 Mj/Kg. Rendimiento = 64%
Zahedi y Daneshgarb (2022)	Simulation and optimization of electricity generation by waste to energy unit in Tehran		Potencia de la turbina inicial = 4.052 Mw. Potencia optimizada = 19 Mw	No específica	No específica
Liang et al. (2022)	Conversion of landfilled waste-to-electricity (WTE) for energy efficiency improvement in Shenzhen (China): A strategy to contribute to resource recovery of unused methane for generating renewable energy on-site	Explora el esquema de incorporar un sistema combinado de refrigeración, calefacción y energía (CCHP) en la central eléctrica WTE utilizando el calor residual de un proceso de generación de energía LFG.	9.68E+8 kWh de electricidad	No específica	Metano=1.34E+10 kg
Ferreira et al. (2021)	Gasification of municipal refuse-derived fuel as an alternative to waste disposal: Process efficiency and thermochemical analysis	Utilizar un combustible derivado de residuos municipales para la gasificación a escala de planta piloto con el objetivo de tratar residuos urbanos y generar energía.	No específica	No específica	Gas de síntesis =704.3 kg/h = 596.9 nm3/h

Mozhiarasi et al. (2021)	Influence of pre-treatments and anaerobic co-digestion of slaughterhouse waste with vegetable, fruit and fower market wastes for enhanced methane production	Evalúa el efecto de la pasteurización (70 °C durante 1 h) y el pretratamiento de extrusión sobre la eliminación de patógenos y la producción de metano en monodigestión anaeróbica y codigestión con residuos mixtos de hortalizas, frutas y flores (VMW) en condiciones de pruebas de digestión anaeróbica (DA) por lotes controlados.	Electricidad generada = 118.07 Kwh/ ton.	No específica	Metano con pasteurización = 169.36 m3/ ton. Metano con pretratamiento = 200.36 m3/ton
Ebrahimian et al. (2020)	Sustainable biofuels and bioplastic production from the organic fraction of municipal solid waste	Producir biocombustibles empleando la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.	No específica	No específica	Ethanol = 98.3 g. Energía = 2,641.8 Kj. Butaneidol = 139.1 g = Energía = 3,831.4 Kj Biohidrógeno = 71, 437 ml. Energía= 918.2 Kj Biometano = 23,089 ml. Energía = 833.5 Kj
Katinas et al. (2019)	Analysis of biodegradable waste use for energy generation in Lithuania	Se analiza el desarrollo de la producción de biogás utilizando las diferentes fuentes de residuos biodegradables.	No específica	No específica	Biogas = 7,943.87 m3- 12,276.89 m3

Mahmoodi, Karimi y Taherzadeh (2018)	Efficient conversion of municipal solid waste to biofuel by simultaneous dilute-acid hydrolysis of starch and pretreatment of lignocelluloses	Convertir la fracción orgánica de residuos sólidos en biocombustibles mediante un tratamiento con ácido diluido	No específica	No específica	Ethanol = 194.4 Kg. Energía = 2,641.8 Kj <hr/> Metano 144.82 m3. Energía = 4,055 Mj
Valentino et al (2018)	Organic Fraction of Municipal Solid Waste Recovery by Conversion into Added-Value Polyhydroxyalkanoates and Biogas	Estudio de una plataforma de biorrefinería en la que la fracción orgánica de los desechos sólidos municipales (OFMSW) se utiliza como fuente valiosa para la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) y biogás.	Energía eléctrica de 85,7 MWh/d	No específica	Fermentador acidogénico. Biogas = 8,080 m3/d Digestor anaeróbico. Biogas = 28,410 m3/d
Yi, Jang y An (2018)	Potential for energy recovery and greenhouse gas reduction through waste to-energy technologies	Evaluar el potencial	Energía elec. 525 540 GJ/ton	No específica	Biogas = 0.443 GJ/ton. Gas de vertedero (0,177 GJ/ton).
Chan et al. (2018)	An economic and carbon analysis of biomethane production from food waste to be used as a transport fuel in Mexico	Realizar un análisis económico de la producción de biometano a partir de residuos de alimentos para ser utilizado como combustible de transporte en México	Energía eléctrica = 42.3 PJ	No específica	Metano = 5,499,681.3 m3 por año / Biogas = 10,184,595 m3 por año

Anexo 2.3. Artículos relacionados con las tecnologías de recuperación de energía de los residuos

AUTOR	TITULO	OBJETIVO	PROCESOS TERMOQUÍMICOS	PROCESOS BIOQUÍMICOS
Samarasinghe y Wijayatunga (2022)	Techno-economic feasibility and environmental sustainability of waste-to-energy in a circular economy: Sri Lanka case study	Viabilidad tecno-económica y sostenibilidad ambiental de la conversión de residuos en energía en Sri Lanka	Incineración: Viabilidad de una planta que procesa 500 toneladas al día 150–200 t/día	No especifica
Padilha y Mesquita (2022)	Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil	Propone un enfoque innovador para analizar la viabilidad financiera de la combinación de destinos consolidados para la gestión de Residuos Sólidos Municipales	No especifica	Captura de gas de vertedero: Periodo de recuperación= 15 años. beneficio =0.04 dólares por habitante. TIR=11.61% Digestión anaeróbica: Periodo de recuperación= 20 años. Beneficio =0.33 dolares por habitante. TIR=11.61%
Sun et al. (2022)	Techno-environmental-economic assessment on municipal solid waste to methanol coupling with/without solid oxygen electrolysis cell unit	Comparar tres procesos tecnológicos que convierten RSU a metanol integrado con captura y almacenamiento de carbono (MTMC) e incineración de RSU a energía (MTP)	Gasificación: Eficiencia energética=60.8%. Utilidades =38.64 USD. Costo de producción =355.89 USD	Captura de gas de vertedero: Eficiencia energética= 41.5%. Costo de producción=355.99 USD
Alayi y Rouhi (2020)	Techno-Economic Analysis of Electrical Energy Generation from Urban Waste in Hamadan, Iran	Diseñar una planta de energía a partir de biomasa a partir del proceso de incineración	Incineración: Inversión inicial=0.22 millones USD. Costos = 2.19 millones USD. Ingresos=3.33 millones USD anuales	No especifica

Mbalane y Oboirien (2020)	A Techno-economic Analysis of Anaerobic Digestion and Gasification Hybrid System: Energy Recovery from Municipal Solid Waste in South Africa	Investigar la viabilidad económica del híbrido de digestión anaeróbica y gasificación de residuos municipales para la generación de electricidad en Sudáfrica.	Gasificación: VAN=656.388 millones. TIR=15.13%. Periodo de recuperación (PR)=7.6. Índice de ganancia (IG)=1.32 <hr/> Sistema híbrido de gasificación. VAN=210.261 millones. TIR=18.49%. PR=8.40. IG= 1.197	Digestión anaeróbica. VAN=298.998 millones. TIR=17.03%. PR=6.86. IG=1.64
Haeldermans et al. (2020)	A comparative techno-economic assessment of biochar production from different residue streams using conventional and microwave pyrolysis	Evaluación tecnoeconómica comparativa en plantas de producción de biocarbón a gran escala (3 ton/h) para pirólisis convencional (CPS) y microondas (MWP)	Pirólisis convencional: VAN=33.64 millones de euros. PR=10.64. Precio de venta=494.36 Pirólisis con microondas: VAN=26.52 millones de euros. PR=16.7. Precio de venta=594.67	No especifica
Dos Santos et al. (2019)	Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis	Evaluar la generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos en tres sistemas diferentes (biogás de rellenos sanitarios; metanización de fracción orgánica en digestores anaerobios; y combustión en incineradores)	Incineración: Inversión=54.319 millones. Ingresos=6.32 millones. VAN=-26.056 millones USD. Costo unitario=5562.06 dólares por Kw.	Vertederos con captura de biogas: Inversión=10.356 millones USD. Energía=24.108 Gwh/año. Ingresos=2.27 millones. VAN=0.583 millones. Costo unitario. <hr/> Digestión anaeróbica: Inversión=12.05 millones. Ingresos=1.85. VAN=-5.14 millones. Costo=4200.49

Yong et al. (2019)	Sustainable Waste-to-Energy Development in Malaysia: Appraisal of Environmental, Financial, and Public Issues Related with Energy Recovery from Municipal Solid Waste	Analiza varias tecnologías WTE en Malasia al considerar los potenciales energéticos de todas las plantas de incineración y vertederos existentes como una gestión eficaz de los RSU en Malasia.	Incineración: Costos = 650 millones de dólares. Beneficio=5,440 millones	No especifica
Panepinto y Zanetti (2018)	Municipal solid waste incineration plant: A multi-step approach to the evaluation of an energy-recovery configuration	Evaluar los aspectos ambientales y económicos de una planta de tratamiento térmico con una configuración de recuperación de energía.	Incineración: Inversión inicial: 322.245 millones. Costos=521.880 millones. VAN= 386.715 millones	No especifica
Fei et al. (2018)	Mechanical biological treatment of municipal solid waste: Energy efficiency, environmental impact and economic feasibility analysis	Analizar la eficiencia energética, impacto ambiental y económico de la conversión de RSU mediante un tratamiento biológico	S2 Incineración: Costos =76.6 Millones por toneladas. Ingresos = 279.4 M. VAN=45.2. TIR=8.85%	No especifica
Yang et al. (2018)	A techno-economic analysis of energy recovery from organic fraction of municipal solid waste (MSW) by an integrated intermediate pyrolysis and combined heat and power (CHP) plant	Análisis técnico-económico integral de una planta de generación de energía y calor basada en pirólisis intermedia integrada y un sistema CHP	Pirólisis: Inversión = 6.23 millones euros. Eficiencia=60%. TIR=-7.2%	No especifica

Zeng et al. (2018)	Technical and economic feasibility analysis of an anaerobic digestion plant fed with canteen food waste	Análisis de implementación de una planta de procesamiento de RSU a partir de la digestión anaeróbica	No especifica	Digestión anaeróbica: VAN=550,900. PR=9 años. Inversión inicial=2.600.920. TIR=10.3%
Fivaja y Dimitriou (2018)	Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment	Viabilidad técnica y económica de un proceso de pirólisis de residuos plásticos para la producción de un sustituto del fuel oil pesado.	Pirólisis: Inversión=999,492 y 416,325. Costos de producción combustible=0.87 euros/Kg. Ingresos=126,000.	No especifica

ANEXO 3. Tablas de frecuencia de los resultados

Tabla 9. Número de artículos sobre tipos de residuos

Tipo de residuos	Frecuencia	Porcentaje
Residuos orgánicos	14	93%
Residuos inorgánicos	11	73%
Total de artículos	15	

Tabla 10. Número de artículos sobre tipo de energía

Tipos de energía	Frecuencia	Porcentaje
Energía eléctrica	6	55%
Combustibles	8	73%
Total	11	

Tabla 11. Número de artículos sobre tipos de tecnologías

Tecnologías	Frecuencia	Porcentaje
Procesos termoquímicos	10	77%
Procesos bioquímicos	6	46%
Total	13	



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, WILBER SAMUEL QUIJANO PACHECO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, asesor de Tesis titulada: "Reutilización de los residuos sólidos urbanos para la producción de energía. Revisión sistemática 2022.", cuyo autor es CORDOVA DELGADO CARLOS MANUEL, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 13.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 25 de Noviembre del 2022

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
WILBER SAMUEL QUIJANO PACHECO DNI: 06082600 ORCID: 0000-0001-7889 -7928	Firmado electrónicamente por: WLSAMUELQUP el 25-11-2022 23:37:24

Código documento Trilce: TRI - 0455349