

Análisis bibliométrico de tecnologías para la valorización de residuos sólidos urbanos y su potencial en el contexto colombiano

Bibliometric analysis of technologies for municipal solid waste valorization and their potential in the colombian context

Laura Ordoñez-Losada¹  David Gómez- Ríos¹  Howard Ramírez-Malule¹ 

¹Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Cali, Colombia

Resumen

El crecimiento constante en la generación de residuos urbanos a nivel global ha generado una creciente necesidad de abordar su gestión de manera sostenible. A pesar de que la conversión de estos residuos en energía ha demostrado ser efectiva en varios países, su implementación en Colombia aún se encuentra en una etapa incipiente. En este estudio, se llevó a cabo un análisis bibliométrico y una revisión sistemática exhaustiva de la literatura con el propósito de evaluar las tecnologías de valorización de los residuos sólidos urbanos, así como su potencial integración en biorrefinerías en el contexto colombiano. Entre las tecnologías más relevantes identificadas se encuentran la incineración, la gasificación, la pirólisis, la digestión anaeróbica y la recuperación de gas de vertedero.

La Digestión Anaerobia destaca como una opción atractiva debido a su versatilidad. No obstante, se reconoce la necesidad imperante de adoptar una elección dinámica de tecnologías, considerando la diversidad de contextos y condiciones específicas en Colombia. Además, la gasificación y la pirólisis emergen como opciones viables, cada una con sus propias ventajas y desafíos, reflejando la complejidad y variabilidad en la gestión de residuos. En relación con la recuperación de gas de vertedero, se subraya su importancia como instalación esencial en vertederos controlados, desestimando la consideración de una alternativa independiente. Si bien la literatura sugiere que la incineración se percibe como menos favorable en términos sociales, económicos y ambientales, es crucial reconocer la dinámica y especificidad de cada situación. La elección de tecnologías debe ser adaptativa y orientada por un enfoque contextual que considere la heterogeneidad en la composición de residuos, infraestructura disponible y otros factores que varían significativamente de un escenario a otro. Este enfoque dinámico y adaptativo es esencial para abordar la complejidad de la gestión de residuos urbanos y encontrar soluciones sostenibles en el contexto colombiano.

Abstract

The constant growth in global urban waste generation has led to an increasing need to address its management sustainably. Despite the proven effectiveness of converting this waste into energy in various countries, its implementation in Colombia is still in its early stages. In this study, a bibliometric analysis and systematic review of the literature was conducted to assess urban solid waste valorization technologies and their potential integration into biorefineries in the Colombian context. Among the identified technologies, incineration, gasification, pyrolysis, anaerobic digestion, and landfill gas recovery stand out.

Anaerobic Digestion emerges as an attractive option due to its versatility. However, there is a recognized imperative to dynamically choose technologies, considering the diversity of contexts and specific conditions in Colombia. Additionally, gasification and pyrolysis appear as viable options, each with its own advantages and challenges, reflecting the complexity and variability in waste management. Concerning landfill gas recovery, its significance as an essential installation in controlled landfills is emphasized, dismissing its consideration as an independent alternative. While the literature suggests that incineration is perceived as less favorable in social, economic, and environmental terms, it is crucial to recognize the dynamics and specificity of each situation.

The choice of technologies must be adaptive and guided by a contextual approach that considers the heterogeneity in waste composition, available infrastructure, and other factors that vary significantly from one scenario to another. This dynamic and adaptive approach is essential to address the complexity of urban waste management and find sustainable solutions in the Colombian context.

Keywords: urban Solid Waste, Waste Valorization, Renewable Energy, Biorefinery, Valorization Technologies.

Palabras clave: Residuos Sólidos Urbanos, Valorización de Residuos, Energía Renovable, Biorrefinería, Tecnologías de Valorización.

¿Cómo citar?

Ordoñez-Losada, L., Gómez-Ríos, D., Ramírez-Malule, H. Análisis bibliométrico de tecnologías para la valorización de residuos sólidos urbanos y su potencial en el contexto colombiano. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(2)e-20813225

<https://doi.org/10.25100/iyv.26i2.13225>

Recibido: 11-09-23

Aceptado: 20-03-24

Correspondencia:

howard.ramirez@correounivalle.edu.co

Este trabajo está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-CompartirIgual4.0.



OPEN  ACCESS

Conflicto de intereses: ninguno declarado

¿Por qué se llevó a cabo?

Este estudio se realizó en respuesta a la creciente preocupación por la creciente generación de residuos urbanos a nivel mundial y la necesidad de prácticas sostenibles de gestión de residuos. A pesar de la eficacia de las tecnologías de conversión de residuos en energía demostrada en varios países, su implementación en Colombia aún se encuentra en sus primeras etapas. Así, este estudio tuvo como objetivo realizar una revisión sistemática integral de la literatura para evaluar la valorización de los residuos sólidos urbanos tecnologías y su potencial integración a las biorrefinerías en el contexto colombiano.

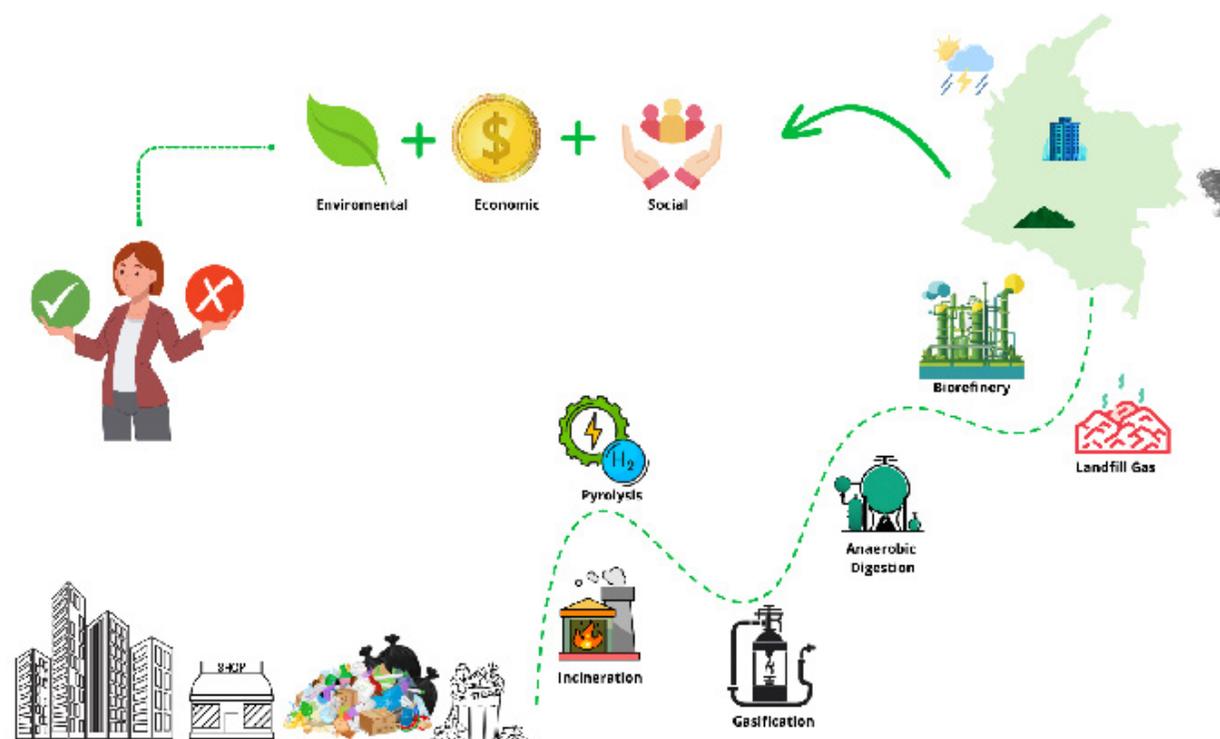
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

El estudio identificó varios hallazgos clave sobre la valorización de los residuos sólidos urbanos tecnologías en el contexto colombiano como incineración, gasificación, pirólisis, digestión anaeróbica y recuperación de gases de vertedero.

¿Qué aportan estos resultados?

Este estudio arroja luz sobre las prácticas sostenibles de gestión de residuos urbanos en Colombia a través de un examen exhaustivo de las tecnologías de valorización de residuos sólidos. Destaca la importancia de la toma de decisiones basada en evidencia y la necesidad de estrategias adaptables que consideren los diversos contextos y condiciones dentro del país. Opciones de resaltado como la digestión anaeróbica, la gasificación y la pirólisis, el estudio proporciona valiosos ideas para los responsables políticos y las partes interesadas de la industria. Abogando por un enfoque holístico que integre consideraciones sociales, económicas y ambientales, exige una concertación esfuerzos para implementar soluciones sostenibles de gestión de residuos adaptadas a las necesidades de Colombia, contribuyendo en última instancia a un medio ambiente más limpio y saludable para todos.

Graphical Abstract



Introducción

En las últimas décadas la generación de residuos se ha convertido en un desafío cada vez más grande para la humanidad. Se estima que la cantidad de residuos producidos superará el crecimiento poblacional en más del doble para el año 2050. Actualmente, se generan alrededor de 2.24 mil millones de toneladas de residuos al año, y se proyecta un crecimiento del 73% en los próximos 30 años (1). Esta tendencia alarmante plantea una serie de desafíos para las ciudades y centros urbanos, ya que la gestión de residuos es costosa y puede afectar otros servicios básicos. Además, la gestión inadecuada de los residuos puede tener un efecto adverso de gran magnitud en la salud colectiva y en el ecosistema (2)

Los residuos gestionados por o para los municipios como un servicio público y que incluyen residuos generados por actividades domésticas, comerciales e institucionales se conocen como Residuos Sólidos Urbanos (RSU) (3–5). Estos frecuentemente se componen de fracciones importantes de papel, restos de alimentos, madera, algodón, cuero, plástico, caucho, tejidos, vidrio y metales (6) y representan alrededor del 50% de todos los residuos generados en el mundo; en países en desarrollo los RSU suelen representar un porcentaje menor, pero están creciendo rápidamente a medida que estos países se urbanizan y sus economías crecen (1). La disposición inadecuada de los RSU provoca impactos significativos, como contaminación de acuíferos, obstrucción del alcantarillado, inundaciones, propagación de enfermedades, reproducción de vectores, quema descontrolada de residuos con emisión de material particulado, daño a los ecosistemas y afectaciones económicas, incluyendo la disminución del turismo (2)

Según el Banco Mundial el 33% del total de RSU no se eliminan de forma ambientalmente segura, esto significa que se queman en incendios abiertos o se disponen en alguna forma de vertedero, de estos vertederos, la mayoría no están equipados con sistemas de recolección de lixiviados y gases, lo que conduce a la polución del suelo y del agua, además de la emisión de volúmenes considerables de gases de efecto invernadero (GEI) (7). Los vertederos contribuyen con más del 5% de las emisiones totales de dióxido de carbono (CO_2) a nivel mundial, así como con el 11% de las emisiones globales de metano (CH_4), este último tiene una capacidad 25 veces mayor que el CO_2 para retener calor en la atmósfera (8,9). Por otro lado, los lixiviados provenientes de los vertederos representan un gran riesgo ambiental por su potencial contaminación a las aguas subterráneas y superficiales ya que causan agotamiento del oxígeno en parte de la masa del agua superficial, cambios en la fauna y flora del fondo de la corriente y toxicidad por amoníaco y metales pesados (10).

En Colombia existen actualmente 281 sitios de disposición final en los que se disponen 11.6 millones de toneladas de residuos al año; solo al 24% de estos sitios de disposición le queda una vida útil de más de 10 años (11). Por esto, la implementación de un sistema integrado de gestión de residuos enfocado en la minimización en la fuente y en metodologías eficientes de reutilización, reciclaje y valorización es esencial para el país en el futuro.

La conversión de residuos en energía ha sido una alternativa aplicada desde la década de 1980 para abordar el problema de los RSU, especialmente en Europa. Esta práctica permite reducir el volumen de residuos y proporciona beneficios económicos, sociales y ambientales al generar energía, reducir la necesidad de utilizar combustibles de origen fósil y disminuir las emisiones de GEI (6,12). Este proceso se lleva a cabo mediante tecnologías de conversión de residuos a energía (WtE, por sus siglas en inglés) como la incineración, gasificación y digestión anaeróbica. Estas técnicas han demostrado ser efectivas en países de la Unión Europea, economías de rápido crecimiento en Asia y también en naciones en desarrollo como Brasil.

En Colombia la producción de investigación sobre el tema es limitada y se encuentra en sus etapas iniciales. Es crucial que la academia plantee alternativas de tratamiento y valorización para abordar los desafíos de gestión de RSU y suministro energético en el país. La ingeniería química desempeña un papel importante en este campo, ya que se encarga del diseño y la optimización de los procesos. Se requiere el desarrollo de sistemas eficientes y seguros que maximicen la producción de energía y minimicen los impactos ambientales. Establecer el contexto general de implementación de estos procesos en Colombia es fundamental para comprender el estado actual del conocimiento, evaluar tecnologías y procesos, identificar desafíos y oportunidades de mejora, y sentar las bases para investigaciones futuras en el área.

Este artículo busca a través de una revisión sistemática de literatura, determinar las tecnologías WtE disponibles más relevantes para la valorización de los RSU y su potencial de implementación en Colombia, además pretende identificar alternativas de integración de tecnologías WtE en biorrefinerías para la conversión de residuos sólidos en productos químicos de valor agregado. Se espera proporcionar una visión integral de las tecnologías existentes más relevantes, así como identificar oportunidades y desafíos, y brindar recomendaciones y perspectivas para la valorización efectiva de los RSU en Colombia, contribuyendo a la promoción de prácticas sostenibles y a la generación de energía limpia.

Metodología

Se realizó un análisis bibliométrico de la literatura, y los resultados encontrados fueron usados para llevar a cabo una revisión sistemática. Se establecieron criterios de inclusión y exclusión para garantizar la relevancia y calidad de los estudios considerados en la revisión. Así mismo, se llevó a cabo una extracción de datos y un análisis crítico de los hallazgos obtenidos, con el fin de obtener conclusiones sólidas y respaldadas por la evidencia científica disponible. Esta combinación de análisis bibliométrico y revisión sistemática constituye un enfoque robusto para abordar los objetivos de investigación propuestos y proporcionar una visión completa y actualizada sobre el tema de estudio.

Análisis bibliométrico

Se utilizó *Scopus* de Elsevier como motor de búsqueda debido a su amplia cobertura de literatura en comparación con otras bases de datos disponibles. *Scopus* incluye revistas de más de 5,000 editoriales y abarca más de 200 millones de publicaciones. Con más de 230 millones de palabras clave (sin embargo, es importante tener en cuenta que algunas de estas palabras clave pueden estar repetidas), facilita la búsqueda de literatura relevante. Además, proporciona resúmenes de todas las publicaciones indexadas, lo que brinda una visión general antes de una lectura detallada. *Scopus* también ofrece herramientas de análisis de citas que permiten rastrear el impacto de las publicaciones, identificar las más influyentes y observar cómo son citadas por otros investigadores. Se formularon ecuaciones de búsqueda utilizando conceptos y términos clave relacionados con los RSU, como *Municipal Solid Waste* y *Urban Solid Waste*. Se incluyeron también términos relacionados como *Waste to Energy* y *Waste Biorefinery* para abordar enfoques específicos de valorización. Se realizaron pruebas con diferentes combinaciones de términos y operadores. Los resultados obtenidos presentados en la tabla 1, reflejan la cantidad de documentos encontrados en cada búsqueda. A medida que se ajustaron los términos y operadores, se observó una variación en el número de resultados, lo que indica la especificidad y amplitud de las búsquedas. Finalmente, se seleccionó la número 6 como la ecuación de búsqueda final.

Tabla 1. Formulación de la ecuación de búsqueda

Búsqueda	Ecuación	Nº de resultados
1	"Municipal Solid Waste" OR "Urban Solid Waste"	29,100
2	("Municipal Solid Waste" OR "Urban Solid Waste") AND ("Waste to Energy")	1,730
3	("Municipal Solid Waste" OR "Urban Solid Waste") AND Energy	7,315
4	("Municipal Solid Waste" OR "Urban Solid Waste") AND ("Waste Biorefinery" OR "technology")	4,813
5	("Municipal Solid Waste" OR "Urban Solid Waste") AND ("Waste Biorefinery" OR "technology" or "Waste to Energy")	5,789
6	("Municipal Solid Waste" OR "Urban Solid Waste") AND ("Waste Biorefinery" OR "technology" or "Waste to Energy") AND NOT ("Wastewater" OR "Sewage")	5,174

De los 5,174 documentos encontrados, más del 60% pertenecen al tipo artículo, como se muestra en la figura 1. Se decidió restringir la búsqueda a este tipo de documentos investigativos para optimizar la calidad y la pertinencia de la información recopilada. Esta decisión se basa en la premisa de que los artículos investigativos suelen ser la fuente principal de datos confiables y actualizados en el campo de estudio, lo que facilitará una investigación más precisa y efectiva.

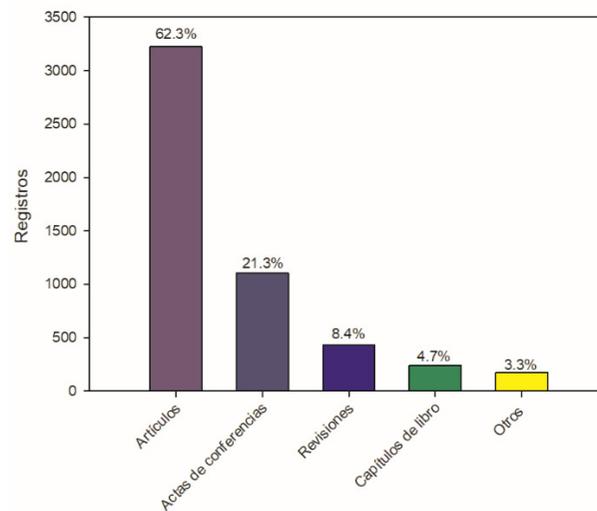


Figura 1. Distribución por tipo de documento en resultados de búsqueda de la ecuación base.

La base de datos registra artículos publicados desde 1971 pero se observa que el 70% de las publicaciones se concentran en el período de 2012 hasta la actualidad, como se muestra en la figura 2. Por lo tanto, se decidió restringir la búsqueda a este intervalo de tiempo para obtener una muestra de 2,326 artículos altamente centrados en la información más reciente y relevante en el campo.

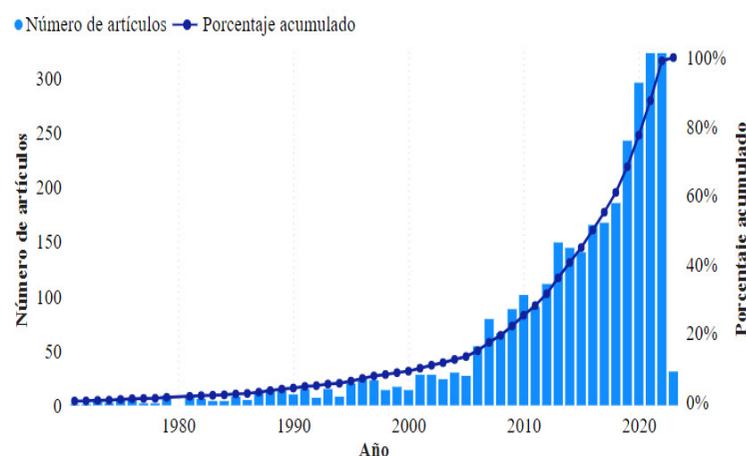


Figura 2. Número de artículos publicados por año y porcentaje acumulado de los mismos

Las áreas de estudio con mayor cantidad de artículos publicados para esta búsqueda son Ciencias Medioambientales (33%), Energía (17%), Ingeniería (13%) e Ingeniería Química (8%). Estos resultados, mostrados en la figura 3, señalan un significativo interés en el desarrollo de estas tecnologías debido a su potencial para abordar el problema de gestión de RSU, proporcionar una fuente de energía renovable alternativa y requerir procesos químicos y físicos complejos que la ingeniería se encarga de diseñar, construir y optimizar.

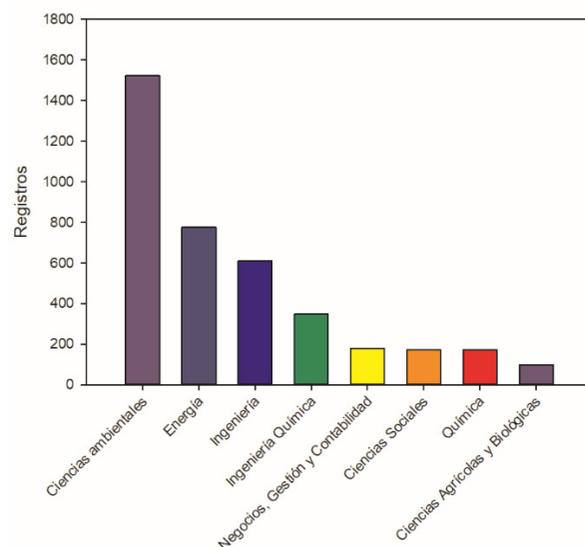


Figura 3. Número de artículos por área de estudio

Se realizó un análisis de la contribución de países o regiones a través de la extracción de información de correspondencia en las publicaciones. Se identificaron autores de 69 países diferentes. La tabla 2 presenta los 20 países más productivos en términos del número de artículos publicados. Para cada país se proporciona el número de publicaciones, la contribución porcentual en esta búsqueda, el promedio de citas recibidas por artículo, el número de publicaciones con colaboración internacional y el índice h. Este último es una medida utilizada para evaluar la productividad y el impacto de un investigador basado en el número de publicaciones que han sido citadas al menos h veces (13). Los rankings correspondientes a cada categoría se indican entre paréntesis.

China, Estados Unidos e Italia lideran la investigación en la conversión de RSU en energía. Estos países se destacan debido a su población, inversión gubernamental, instituciones académicas de renombre y un fuerte interés industrial en estas tecnologías. Su objetivo principal es desarrollar métodos eficientes y sostenibles para la gestión de RSU, con el propósito de reducir el impacto ambiental y generar oportunidades de negocio y empleo. A nivel mundial, se observa un impulso significativo en la generación de energía a partir de residuos, con casos destacados en Estados Unidos, China y países de la Unión Europea. Italia ha implementado la codigestión anaeróbica para aprovechar los residuos orgánicos. Además, se observa un interés creciente en países como India, Vietnam y Malasia, que están empezando a recuperar energía de los residuos orgánicos. Sin embargo, muchos países en desarrollo aún no reconocen plenamente el potencial de estas tecnologías, lo que representa una oportunidad para futuras investigaciones y desarrollo en esta área (14).

Tabla 2. Publicaciones científicas por país en el campo de la conversión de residuos en energía.

País	Nro. de publicaciones	Porcentaje (%)	Citaciones promedio por artículo	Publicaciones con colaboración internacional	Índice h
China	563 (1)	18.1%	18 (14)	284 (1)	50 (1)
Estados Unidos	216 (2)	6.9%	21 (12)	160 (2)	40 (3)
Italia	210 (3)	6.7%	32 (1)	97 (5)	44 (2)
India	208 (4)	6.7%	17 (18)	97 (6)	35 (4)
Reino Unido	108 (5)	3.5%	26 (4)	122 (3)	29 (5)
Brasil	99 (6)	3.2%	17 (19)	35 (17)	23 (10)
España	95 (7)	3.0%	24 (6)	58 (11)	26 (6)
Malasia	86 (8)	2.8%	27 (3)	108 (4)	24 (7)
Alemania	80 (9)	2.6%	18 (15)	95 (7)	23 (8)
Irán	75 (10)	2.4%	18 (16)	47 (13)	23 (9)
Japón	61 (11)	2.0%	22 (11)	51 (12)	21 (12)
Australia	59 (12)	1.9%	24 (7)	59 (10)	22 (11)
Polonia	53 (13)	1.7%	18 (17)	39 (16)	14 (19)
Suecia	51 (14)	1.6%	24 (8)	45 (14)	18 (15)
Canadá	50 (15)	1.6%	19 (13)	30 (19)	15 (18)
Francia	46 (16)	1.5%	25 (5)	59 (9)	18 (14)
Arabia Saudí	45 (17)	1.4%	31 (2)	59 (8)	20 (13)
Taiwán	45 (18)	1.4%	24 (9)	32 (18)	18 (16)
Rusia	45 (19)	1.4%	7 (40)	26 (20)	11 (20)
Grecia	44 (20)	1.4%	17 (20)	40 (15)	16 (17)

Análisis de redes

El análisis de redes es un método cuantitativo para estudiar las relaciones entre actores en una red. Se utiliza para identificar y visualizar las conexiones entre autores, instituciones y palabras clave, así como para detectar tendencias de investigación emergentes (15). Con el software VOSviewer, se realizaron análisis de redes entre países y palabras clave para identificar las tecnologías WtE más relevantes en la literatura actual. VOSviewer permite representar gráficamente la estructura de la información bibliométrica y analizar los patrones de relación entre los términos clave en la literatura.

En la figura 4 se presenta la red de colaboración entre los 46 países más productivos. Se identificaron 6 grupos distintos representados por diferentes colores. Se observa que los países tienden a colaborar principalmente con otros países de la misma región, lo cual es consistente con las expectativas.

Colombia ha publicado un total de 20 artículos, 12 de los cuales fueron realizados en colaboración con 9 países diferentes, como Brasil, España, Reino Unido, Australia, China, Cuba, Estados Unidos, Suiza y Taiwán. Aunque la cantidad de publicaciones es relativamente baja en comparación con otros países, se nota un creciente interés en el desarrollo de soluciones sostenibles para la gestión de residuos y la generación de energía. Entre las investigaciones destacadas se encuentran aquellas

que evalúan sistemas de incineración, análisis predictivos sobre la generación de RSU en Bogotá y donde se explora la producción de electricidad a partir de desechos alimentarios en celdas de combustible microbianas. Sin embargo, aún existe una brecha en investigaciones detalladas y completas sobre la posibilidad de la generación de energía a partir de RSU en diferentes regiones de Colombia, así como en aspectos sociales y de participación comunitaria. Se requiere más enfoque en tecnologías emergentes y alternativas, así como investigaciones a largo plazo sobre los efectos ambientales de estas tecnologías en el país.

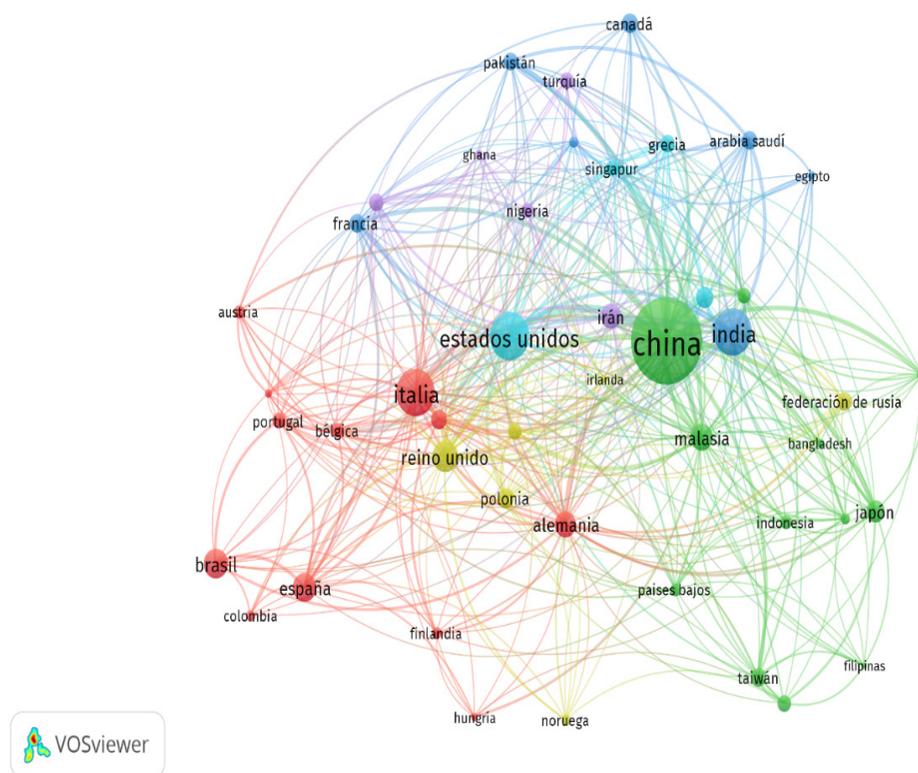


Figura 4. Mapa de red de coautoría entre los 46 países más productivos

En la figura 5 se presenta la co-ocurrencia de las palabras clave de autor que se repiten más de 15 veces en los resultados. Se observan 6 grupos diferenciados por colores, los cuales han sido numerados y nombrados según la relación entre los términos. Entre las tecnologías con mayor co-ocurrencia de palabras clave en las publicaciones analizadas, se destacan la incineración (253), gasificación (142), Digestión Anaeróbica (121), vertedero con recuperación de gas (119) y pirólisis (63). Además, se identificaron otras tecnologías con menor número de menciones, como el combustible derivado de residuos (RDF, por sus siglas en inglés), el tratamiento mecánico biológico, la gasificación por plasma y la carbonización hidrotermal.

A partir de estos resultados, se identificaron las 5 tecnologías más populares en las investigaciones, las cuales serán objeto de análisis en la revisión sistemática. Esta selección indica que estas tecnologías están relativamente bien desarrolladas en el sector de gestión de residuos a nivel mundial.

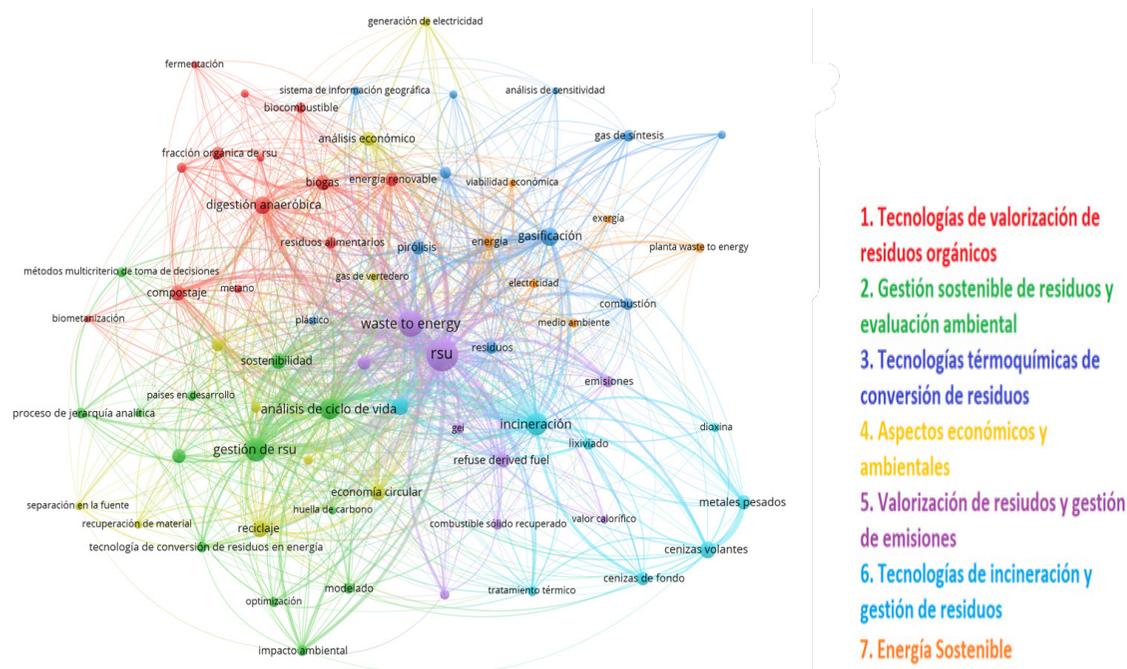


Figura 5. Coccurrencia de palabras clave de autor

Selección de artículos científicos

Luego de llevar a cabo la búsqueda se procedió a evaluar los títulos y resúmenes de las publicaciones más relevantes en función de citas, coincidencia con los términos de búsqueda y origen colombiano. Además, se realizaron búsquedas específicas dentro de los resultados iniciales para cada área de interés, seleccionando los artículos más relevantes en cada categoría. Esto garantizó la objetividad y calidad de la revisión, proporcionando una base sólida de evidencia científica para respaldar las conclusiones y recomendaciones. Además, se incluyeron fuentes complementarias como informes gubernamentales y tesis para complementar la investigación y brindar una perspectiva más completa y contextualizada. Esta inclusión fortaleció la validez y justificación de los resultados obtenidos.

Análisis de las curvas S de patentes

Se realizó un análisis del desarrollo tecnológico de las 5 tecnologías más relevantes seleccionadas previamente, utilizando un enfoque innovador basado en las curvas S generados a partir de datos de patentes. Esta metodología se emplea para comprender el crecimiento tecnológico a lo largo del tiempo, identificando fases clave como emergencia, crecimiento, madurez y saturación (figura 6). No obstante, es relevante destacar que la interpretación de estos datos puede estar influenciada por diversos factores, como consideraciones políticas, que podrían impactar el desarrollo real de una tecnología y no reflejar de manera precisa su nivel de madurez. La curva "S" permite estimar el nivel de crecimiento tecnológico en cada etapa y prever cuándo una tecnología alcanzará un estado particular. Se usa especialmente en estudios basados en datos de patentes para predecir la evolución de tecnologías y su impacto en diferentes industrias.

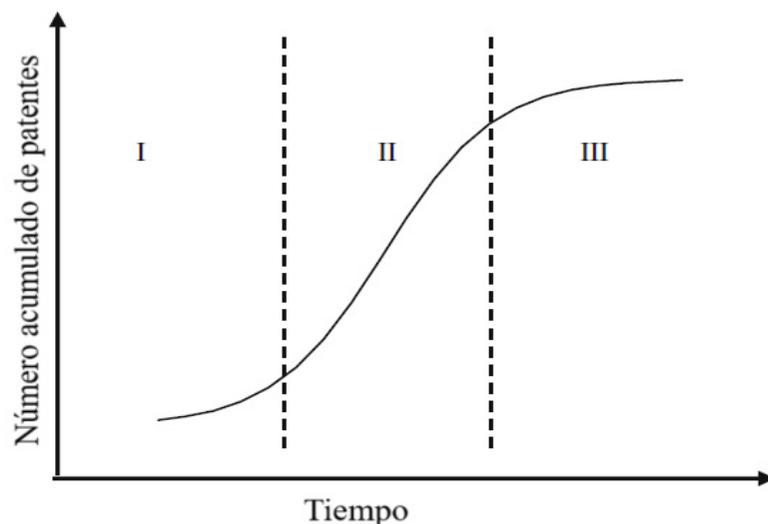


Figura 6. Curva S de la tendencia de desarrollo tecnológico donde I, II y III representan la etapa de emergencia, crecimiento y saturación, respectivamente

Los datos de patentes se recopilaron de la base de datos Patentscope de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) en la ventana de tiempo desde el año 1971 hasta 2022. Esta es una de las bases de datos de patentes más grandes y completas del mundo que contiene más de 100 millones de documentos de patentes de más de 190 países. Para ajustar los datos recopilados se utilizó el sistema de ajuste de curvas en línea Loglet Lab 4 que utiliza el modelo logístico descrito en detalle por Liu & Wang, (16) y Meyer et al., (17). Los datos de entrada son las cantidades acumuladas de patentes otorgadas hasta cada año. El sistema Loglet Lab 4 procesa el ajuste de curvas y genera automáticamente una curva "S". La figuras 7, 8, 9, 10 y 11 muestran, respectivamente, las curvas S para la tecnología de incineración, gasificación, digestión anaeróbica, gas de vertedero y pirólisis.

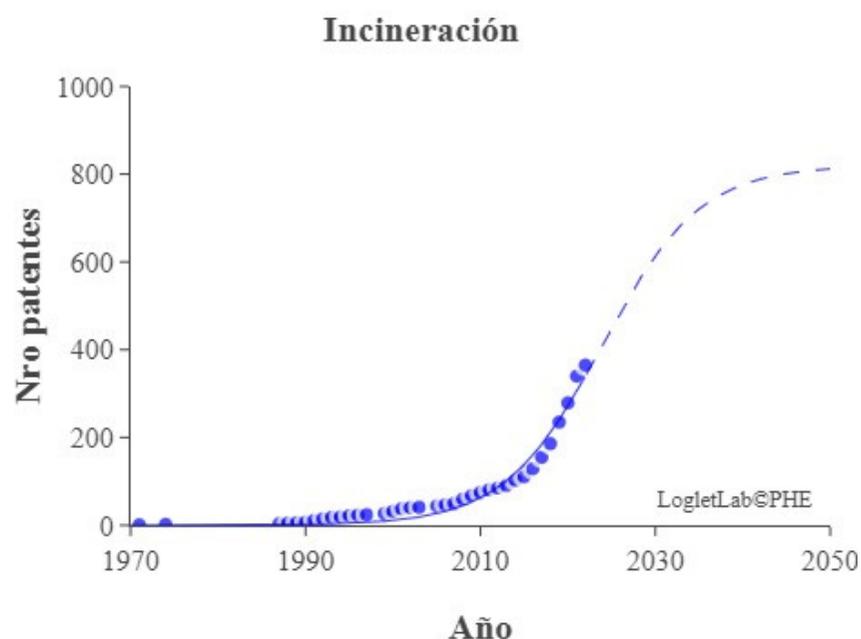


Figura 7. Curva S para Incineración

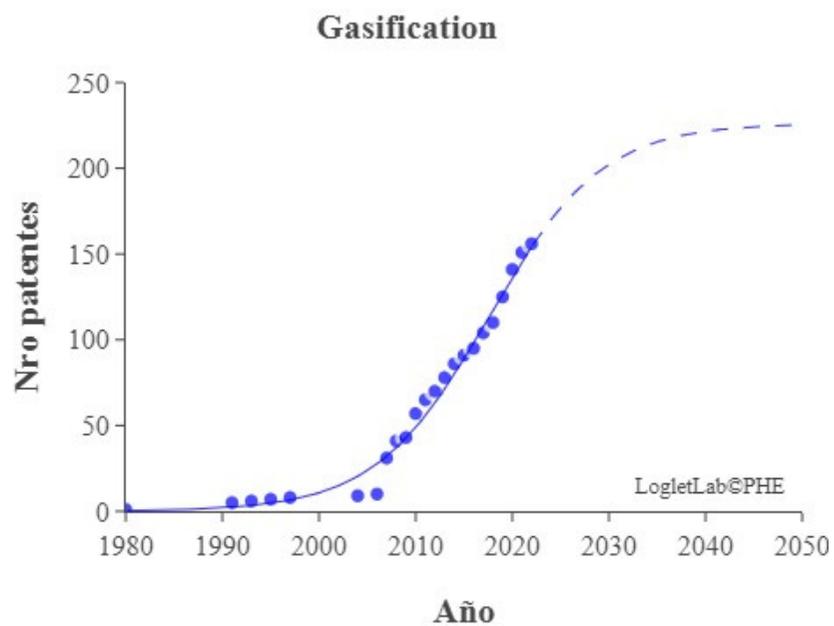


Figura 8. Curva S para Gasificación

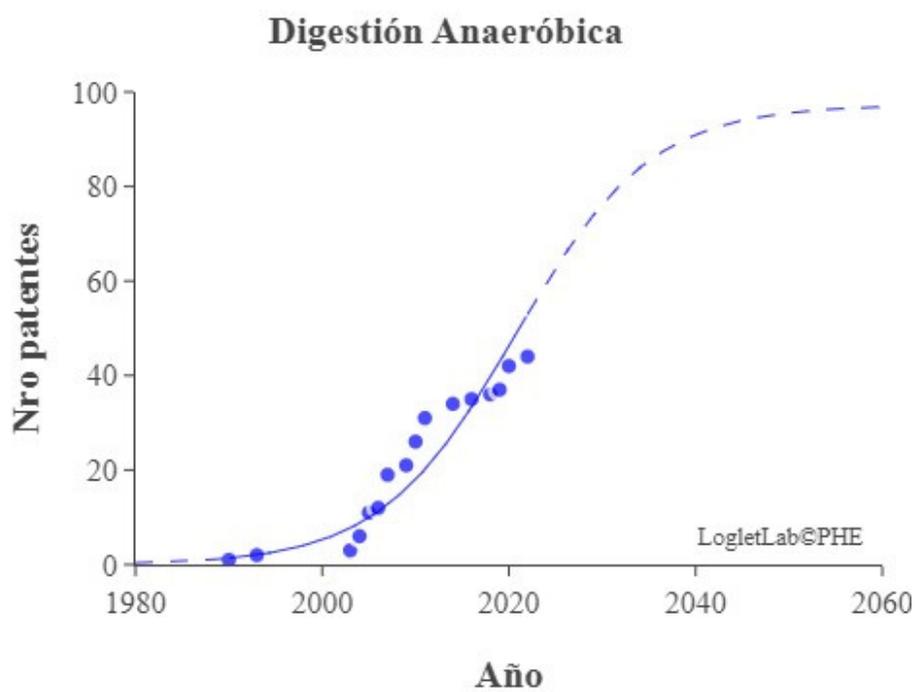


Figura 9. Curva S para Digestión Anaeróbica

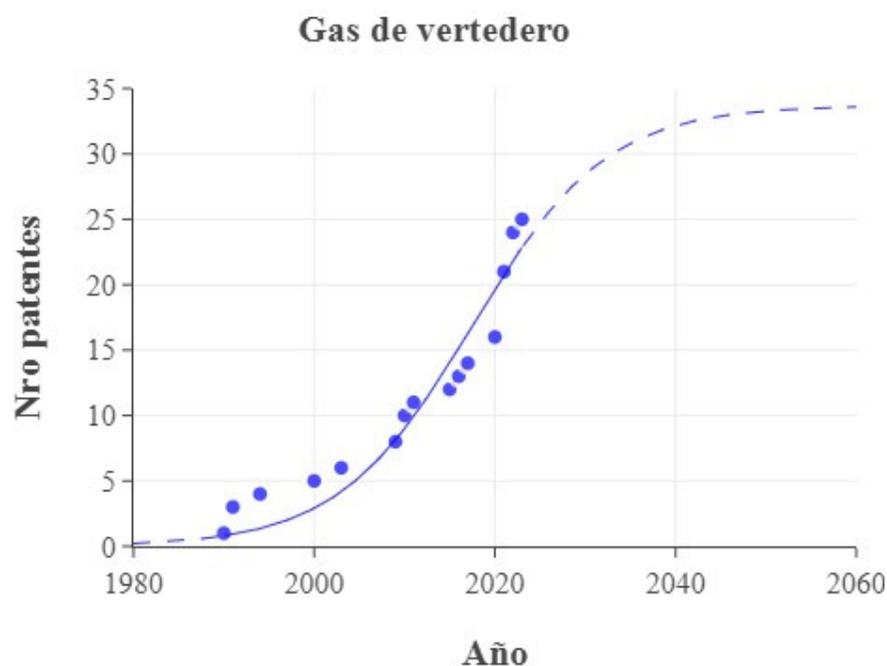


Figura 10: Curva S para Gas de vertedero

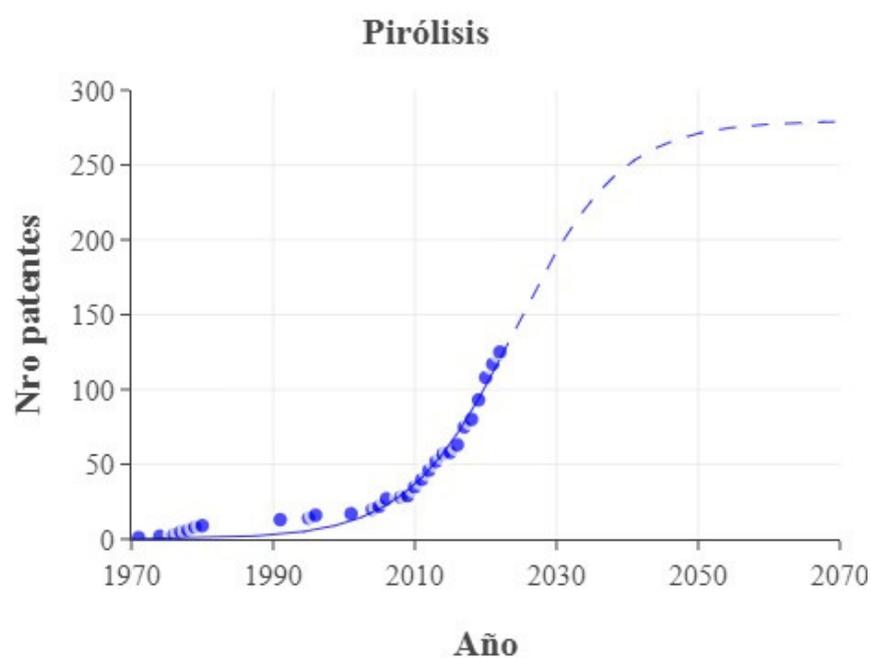


Figura 11. Curva S para Pirólisis

La curva S de la incineración muestra un periodo de crecimiento constante en el número de patentes hasta el punto de inflexión en 2024. Sin embargo, la curva alcanza un valor límite de patentes en 820, lo que podría indicar una desaceleración en la innovación después de la madurez. Esto podría ser debido a la consolidación de soluciones establecidas en la industria de la incineración, pero también podría indicar la aparición de regulaciones más restrictivas que limitan el enfoque de esta tecnología. Según esta curva, la incineración se encuentra en fase de crecimiento con una adopción industrial significativa, pero posiblemente llegando a la madurez. La saturación se proyecta en 2050.

A diferencia de la curva de incineración, la curva de gasificación muestra un menor número total de patentes. El punto de inflexión en 2023 (con 1,745 patentes) sugiere un crecimiento más moderado en comparación con la incineración. La proximidad del valor límite de patentes en 349 podría indicar que la gasificación está alcanzando la madurez de manera más temprana, lo que podría deberse a una mayor concentración de esfuerzos de investigación en esta tecnología específica. Según la curva, la gasificación se encuentra en fase de crecimiento con un enfoque más específico, cercano a la madurez y posiblemente más adoptado en industrias especializadas.

La curva de digestión anaeróbica muestra una tendencia similar a las anteriores en términos de crecimiento y madurez, aunque con un número aún menor de patentes. A pesar de su punto de inflexión en 2021, que indica un aumento en la inversión en investigación y desarrollo, la tecnología parece tener un límite de patentes en 97.3. Esto podría reflejar una menor adopción industrial en comparación con otras tecnologías. Según la curva, la Digestión Anaeróbica se encuentra en crecimiento, pero con una adopción más limitada y un valor límite de patentes relativamente bajo, indicando una menor adopción industrial.

La curva de pirólisis muestra una tendencia similar en términos de crecimiento y saturación, con un punto de inflexión en 2024 y un valor límite de patentes en 280. Sin embargo, la curva se extiende hasta el punto de saturación en 2070, lo que podría indicar una adopción más lenta o limitada en comparación con otras tecnologías. Esto podría deberse a desafíos técnicos o económicos específicos asociados con la pirólisis. Según la curva, la pirólisis se encuentra en crecimiento con una adopción moderada, pero la saturación proyectada en 2070 sugiere un ritmo más lento en comparación con otras tecnologías.

La curva del gas de vertedero muestra una de las tasas más bajas de crecimiento en patentes, con un punto de inflexión en 2024 y un valor límite de patentes en 34.5. Esto sugiere que la tecnología del gas de vertedero podría estar en una fase más temprana de desarrollo o experimentando desafíos en términos de adopción industrial. Según la curva, la recuperación de gas de vertedero se encuentra en etapas iniciales de crecimiento con una tasa de adopción lenta y un valor límite de patentes bajo, indicando un desarrollo temprano.

Revisión sistemática: tecnologías para la conversión de RSU en energía

Las tecnologías WtE aprovechan residuos para generar energía mediante diferentes técnicas. Sus ventajas incluyen reducción de masa y volumen, preservación del espacio en vertederos, degradación de contaminantes, uso de materiales reciclables y reducción de emisiones de GEI (18,19). A nivel global, hay más de 1700 plantas de conversión de RSU en energía, con mayor presencia en Asia Pacífico (62%), Europa (33%) y América del Norte (4.5%) (20).

Tecnologías termoquímicas

Las tecnologías termoquímicas de conversión de RSU en energía implican el tratamiento térmico de la materia orgánica para obtener combustible altamente oxigenado, biochar o gas (21,22). Las tecnologías termoquímicas utilizan residuos secos con alto contenido de materia orgánica no biodegradable. Estos procesos, como la incineración, gasificación y pirólisis, se distinguen por altas temperaturas y velocidades de conversión rápidas en comparación con los procesos bioquímicos (23).

Incineración

La incineración es una tecnología ampliamente utilizada en la conversión termoquímica. Consiste en la oxidación de los materiales combustibles presentes en los RSU, generando calor de alta temperatura que puede ser aprovechado para la producción de electricidad (24). Además, reduce de manera significativa el peso y volumen de los RSU, en aproximadamente un 80-85% y 90-95%, respectivamente, reduciendo la necesidad de vertederos (25-27). Sin embargo, presenta desafíos debido a la composición variable de los residuos y la presencia de componentes peligrosos (28). La figura 12 esquematiza el proceso.

Durante la incineración se generan subproductos como cenizas volantes, gases de combustión y residuos sólidos. Por lo tanto, es necesario implementar un estricto control de emisiones y utilizar tecnologías avanzadas de tratamiento de gases de escape para minimizar los impactos ambientales y en la salud (19,29).

Según la composición de los RSU y las condiciones de operación la incineración de RSU puede generar compuestos como partículas, dioxinas, furanos, NO_x, SO_x, COVs y compuestos de metales pesados, que representan una amenaza para el ecosistema y los seres vivos (24,30), por lo que se requieren medidas de control de emisiones y estabilización antes de la disposición final de las cenizas. Tecnologías como filtros, precipitadores electrostáticos, limpieza en húmedo y reacciones químicas se emplean con el propósito de eliminar los contaminantes de los gases de combustión (24).

El objetivo del proceso es lograr una combustión completa suministrando una cantidad de aire en exceso, entre un 40% y un 150% por encima del valor estequiométrico para garantizar suficiente oxígeno en la zona de combustión (31). Además, se requiere mantener una temperatura de al menos 1070°C (32). El ingreso de residuos a la cámara de combustión solo ocurre cuando se alcanza la temperatura mínima requerida (24). Sin embargo, se debe evitar que la temperatura supere los 1200 – 1250°C para evitar la fusión de las cenizas. Las plantas modernas operan a temperaturas controladas de 1050-1150°C (19), y son eficientes para destruir estas sustancias orgánicas peligrosas y recuperar energía (18).

La composición de los residuos y el diseño del equipo de combustión son factores clave a considerar. Los tipos de incineradores incluyen rejilla móvil/fija, horno rotatorio y lecho fluidizado. La tecnología de rejilla se considera madura y estable, mientras que el lecho fluidizado ofrece ventajas en la combustión completa y la adaptabilidad a residuos de baja calidad (20,28). La generación de energía se logra mediante un generador de vapor integrado con el incinerador. Puede ser térmica, eléctrica o combinada. La producción combinada de calor y energía (CHP, por sus siglas en inglés), se considera la mejor técnica para la recuperación de energía, con resultados superiores en eficiencia energética y evaluaciones de ciclo de vida en comparación con la generación solo de electricidad (33).

La eficiencia neta de la producción de energía de las instalaciones de incineración actuales alcanza valores de hasta el 26% (30). Las instalaciones de CHP suelen tener mayores eficiencias, aunque la generación exclusiva de electricidad puede ser una opción si no hay usuarios térmicos cercanos a la planta (33). Con el fin de mejorar la eficiencia en la generación de energía a partir de RSU, se pueden implementar estrategias como el aumento de la presión y temperatura del vapor utilizado, la minimización de las pérdidas de calor recirculando los gases de escape, la producción CHP, el pretratamiento de los RSU mediante plantas de clasificación mecánica y la integración de ciclos combinados de vapor y gas (33).

Esta tecnología es más favorable en países desarrollados debido a regulaciones ambientales más estrictas y mayores recursos económicos disponibles. Por otro lado, en países en desarrollo, enfrentan desafíos debido a limitaciones económicas, composición desfavorable de los RSU, falta de experiencia técnica y disponibilidad de terrenos adecuados. Las plantas de incineración ofrecen beneficios como alimentación continua, tratamiento rápido y reducción de emisiones, pero también presentan limitaciones en volúmenes pequeños, producción de dioxinas y tratamiento de residuos con alta humedad y bajo valor calorífico (34).

Las plantas de incineración con mayor capacidad en el mundo se encuentran en países como China, Alemania, Estado Unidos, Japón, España, Países Bajos y Francia. A excepción de China, los RSU de estos países se componen principalmente por papel y cartón, plásticos y metales lo que los hace tener un contenido energético mayor que el de los RSU producidos en países en desarrollo donde predominan los residuos orgánicos con alto contenido de humedad (30). China enfrenta problemas en sus procesos de incineración de RSU por mala calidad de residuos y contaminación del aire.

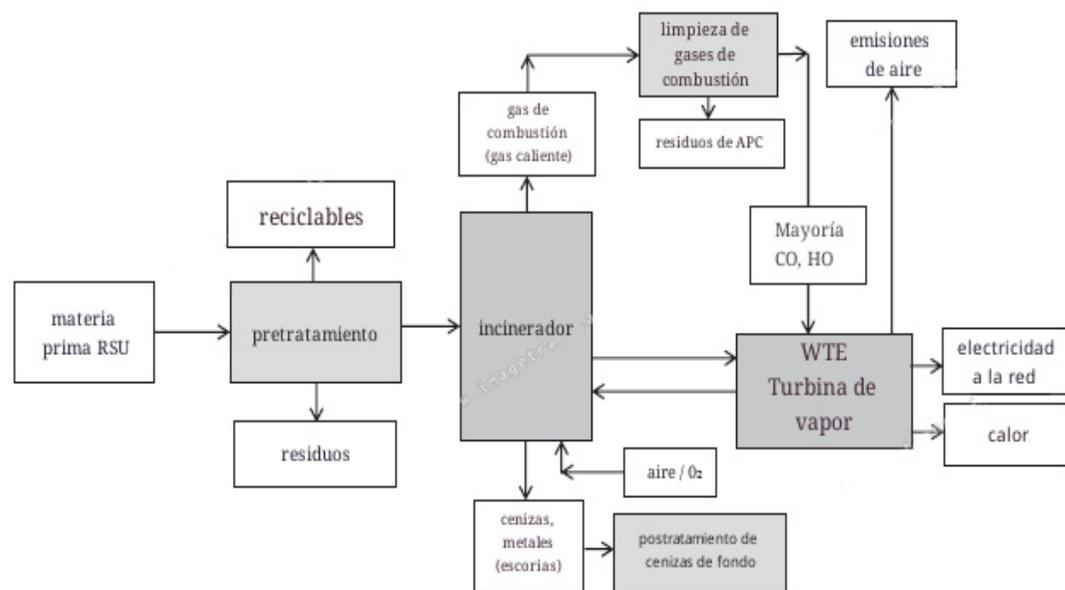


Figura 12. WtE: de RSU a energía (y calor) a través de la incineración (APC significa control de la contaminación del aire) (30).

Gasificación

La gasificación es un proceso de transformación de los RSU en gas de síntesis, un combustible gaseoso que puede ser utilizado para generar energía, así como para la producción de productos químicos y combustibles líquidos (19,35). Además, durante el proceso se genera coque (carbón), un subproducto combustible. El gas de síntesis se compone por una mezcla de H_2 , CO , CO_2 , CH_4 y trazas de otros compuestos (19,25) y puede ser empleado como materia prima en la industria química mediante diversos procesos de reformado, así como fuente de combustible para la generación eficiente de electricidad y/o calor (24,30). Esta conversión implica la oxidación parcial del carbono contenido en los RSU a altas temperaturas, generalmente entre 600 y 1,800°C, utilizando como medio de gasificación el aire, el oxígeno, el vapor o plasma en cantidad inferior a la requerida para la combustión estequiométrica (26,32,33). Durante el proceso se generan trazas de otros compuestos como etano y propano, gases inertes originados del agente de gasificación y varios contaminantes como pequeñas partículas de carbón (33). Varios factores, como el tipo de residuos, el tipo de gasificador y las condiciones de operación, como la temperatura, el tiempo de residencia y el oxidante utilizado, afectan las características del gas de síntesis producido (34,36). El gas resultante se puede utilizar para generar electricidad en ciclos altamente eficientes, como turbinas de gas, ciclos combinados de turbina de gas y vapor, o motores de combustión interna (33,34). La figura 13 esquematiza el proceso de gasificación.

Generalmente se requiere algún tipo de pretratamiento de los RSU antes de poder ser gasificados ya que es necesario que los residuos mantengan el tamaño y la consistencia dentro de ciertos límites predefinidos, pero esto depende del diseño y configuración del reactor de gasificación (26). Existen diferentes tipos de reactores de gasificación, como el de lecho fijo, lecho fluidizado, flujo arrastrado, horno rotatorio y reactor de plasma, cada uno con condiciones de operación y aplicaciones específicas (30). Los procesos de gasificación se clasifican según el medio de oxidación utilizado: oxidación parcial con aire, aire enriquecido con oxígeno u oxígeno puro; gasificación con vapor de agua; y gasificación con plasma. El poder calorífico del gas de síntesis obtenido aumenta en ese mismo orden (37).

Las eficiencias generales de conversión de RSU a electricidad utilizando un ciclo de vapor convencional, son comparables a las de la incineración, alrededor del 18-22%, sin embargo, pueden aumentar hasta un 26-28% con el uso de un motor de gas o hasta el 30% con una turbina de gas (33). Este tipo de plantas tienden a ser más costosas que las de incineración, pero presentan algunas ventajas como una reducción de volumen mayor al 95% (24,27), menores requerimientos de limpieza de gases de combustión, emisiones más bajas de CO₂ y la generación de H₂ como portador de energía limpia, con un alto valor calorífico y una baja tasa de exergía (24,26,30). La gasificación por plasma ofrece una mayor eficiencia en la generación de electricidad y una menor formación de subproductos no deseados, como alquitranes, que pueden causar obstrucciones en las tuberías y equipos posteriores (23,29,30). La aplicación principal del plasma térmico se centra en la destrucción de residuos peligrosos en lugar de recuperación de energía (33). Di Matteo et al., (2017), encontraron que la gasificación por arco de plasma tiene eficiencia térmica superior, en comparación con otras tecnologías de gasificación convencional, además de tener el ingreso neto anual más alto. Este proceso produce escoria vitrificada que es un subproducto ambientalmente aceptable que puede generar ingresos adicionales como material de construcción.

La tecnología de gasificación enfrenta desafíos técnicos, económicos y de viabilidad para una mayor adopción, pues aún no está en desarrollo y el número de plantas comerciales es limitado (23). A pesar de su fiabilidad técnica y buen desempeño ambiental, la gasificación enfrenta altos costos de operación y capital que obstaculizan su penetración en el mercado. Se requiere reducir el costo de la limpieza del gas de síntesis y mejorar la eficiencia de conversión de energía eléctrica. La investigación y la experiencia obtenida de las plantas en funcionamiento comercial serán fundamentales para determinar su competencia con los sistemas de combustión convencionales en el futuro.

Asia ha experimentado un gran avance en los últimos años y puede considerarse uno de los mercados más favorables para esta tecnología, seguido de Europa, África y Estados Unidos (38). Canadá ha mostrado preferencia por las instalaciones de gasificación y gasificación por plasma en sus instalaciones WtE más recientes (32). Actualmente hay 33 plantas de gasificación en funcionamiento en Estados Unidos, principalmente usando combustibles a base de carbono con una menor cantidad de RSU, la mayoría se encuentran en etapas de demostración o validación experimental para su uso a escala industrial y piloto (29).

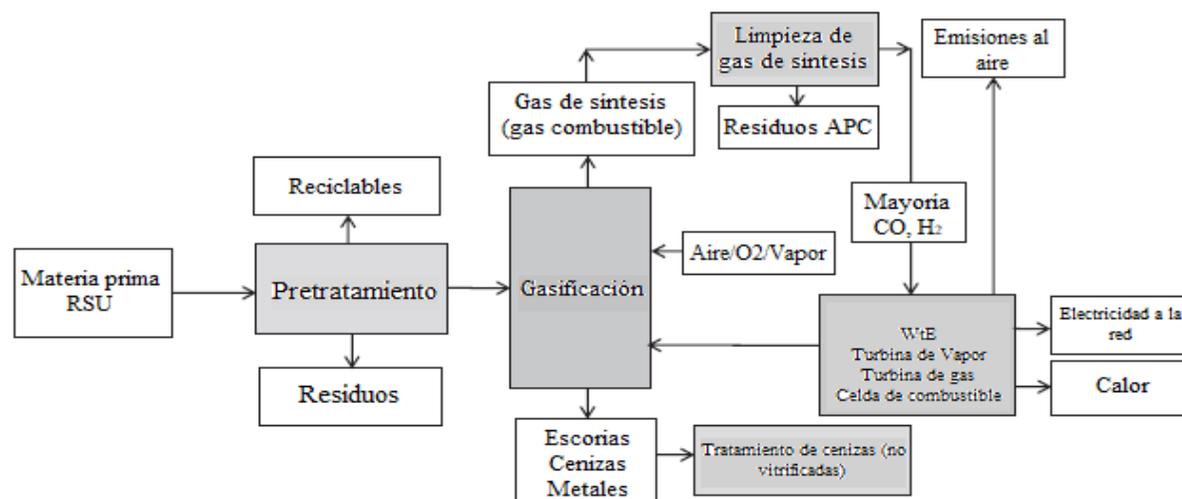


Figura 13. WtE: de RSU a energía (y calor) a través de la gasificación (APC significa control de la contaminación del aire) (30).

Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico en el que los RSU se degradan térmicamente a altas temperaturas en un entorno inerte. Se realiza a temperaturas de 400-900°C, generalmente por debajo de 700°C (19,30), tiene la capacidad de reducir el volumen de los residuos en un 50-90% (27). Mediante este proceso se obtienen productos como: biochar y bioaceite, además de gases menores como CH_4 , CO , H_2 y CO_2 (39), las proporciones relativas de estos productos dependen de las características de la materia prima, el método del proceso y de los parámetros del reactor. Aunque la pirólisis de biomasa ha sido ampliamente estudiada, la pirólisis de RSU aún está en etapas de investigación. Se han realizado estudios sobre la pirólisis de distintos tipos de residuos, como plásticos, neumáticos, madera y equipos eléctricos y electrónicos (33). Entre las desventajas del proceso está que es necesario realizar una separación física de los elementos no combustibles antes del proceso, y el uso de catalizadores, aunque aumentan la eficiencia e incrementan los costos. La figura 14 esquematiza el proceso general de pirólisis.

El líquido condensado derivado de compuestos volátiles presenta aplicaciones versátiles, ya sea como bioaceite combustible tras procesos mejorados adicionales o como precursor esencial en la síntesis de productos químicos (23). La pirólisis, un proceso esencial para la obtención de este líquido, abarca diversas variantes, cada una contribuyendo a la formación de una amplia variedad de productos. Estas variantes abarcan la carbonización (hasta 400 °C), que se enfoca en la producción principal de carbón vegetal; la pirólisis lenta (5-30 minutos, hasta 600 °C), que proporciona tanto carbón vegetal como aceite de pirólisis; la pirólisis rápida (0.5-5 segundos, hasta 650 °C), que busca obtener eficientemente aceite de pirólisis y gas de pirólisis; la pirólisis flash (menos de 1 segundo, menos de 650 °C), orientada a la obtención de aceite de pirólisis líquido y gas de pirólisis; la pirólisis ultra (menos de 0.5 segundos, hasta 1000 °C), con el propósito de generar productos químicos en forma de gas y combustible; la pirólisis al vacío a baja presión para la producción de aceite de pirólisis; la hidropirólisis (menos de 10 segundos, menos de 500 °C), destinada a la obtención de aceite de pirólisis y productos químicos; y la metanopirólisis (menos de 10 segundos, más de 700 °C), que busca la formación de productos químicos en forma de gas (36,39). En particular, las variantes con tiempos de pirólisis extraordinariamente cortos, como la pirólisis rápida, la pirólisis flash y la pirólisis ultra, se destacan por su eficacia en la producción específica de aceites, gases y productos químicos. Estos procesos minimizan la exposición de la materia orgánica a condiciones propicias para reacciones secundarias indeseadas, maximizando así la selectividad de los productos finales y optimizando la eficiencia global del proceso de pirólisis.

Existen diferentes tipos de reactores utilizados para tratar RSU, como hornos rotatorios y reactores tubulares a gran escala, así como reactores de lecho fijo y lecho fluidizado en estudios a escala de laboratorio (25). Estos reactores convencionales pueden combinarse con sistemas de gasificación o combustión para su operación (7)(40). Los rendimientos y la composición de los productos resultantes de la pirólisis son afectados por factores como la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia. A medida que aumenta la temperatura, se incrementa la producción de gas y compuestos aromáticos. Un tiempo de residencia más largo puede aumentar la producción de gas, pero reducir la capacidad de tratamiento de RSU. Además, altas velocidades de calentamiento favorecen la formación de productos volátiles (14,41). La temperatura de pirólisis también afecta la estabilidad y propiedades del carbón pirólico, y el uso de catalizadores reduce la formación de subproductos indeseables. Comparado con la incineración, la pirólisis muestra ventajas en la reducción de la liberación de metales pesados y contaminantes orgánicos volátiles. Para el control de emisiones contaminantes, el lavado de gases de escape se considera el método más eficiente. (23).

Los estudios sobre la aplicación de la pirólisis a los RSU se han centrado principalmente en el desarrollo tecnológico y diseño del sistema, con poca investigación sobre su viabilidad y uso comercial. En Europa, la planta de pirólisis de RSU en Burgau, Alemania, ha estado generando electricidad desde 1986, pero no se están construyendo nuevas instalaciones de este tipo a gran escala en la actualidad (23). Existen otras plantas que funcionan con éxito en Alemania, Reino

Unido, Francia y Japón. En este último, tiene popularidad la pirólisis de desechos neumáticos para la producción de gas, aceite, acero y carbono (27). Plantas con capacidad de 10 toneladas/día operan con éxito en países como India (29). Aunque estas plantas son pequeñas, representan una importante fuente de energía. Sin embargo, la implementación de estas plantas en países en desarrollo enfrenta desafíos debido a la falta de infraestructura, experiencia técnica y aceptación pública.

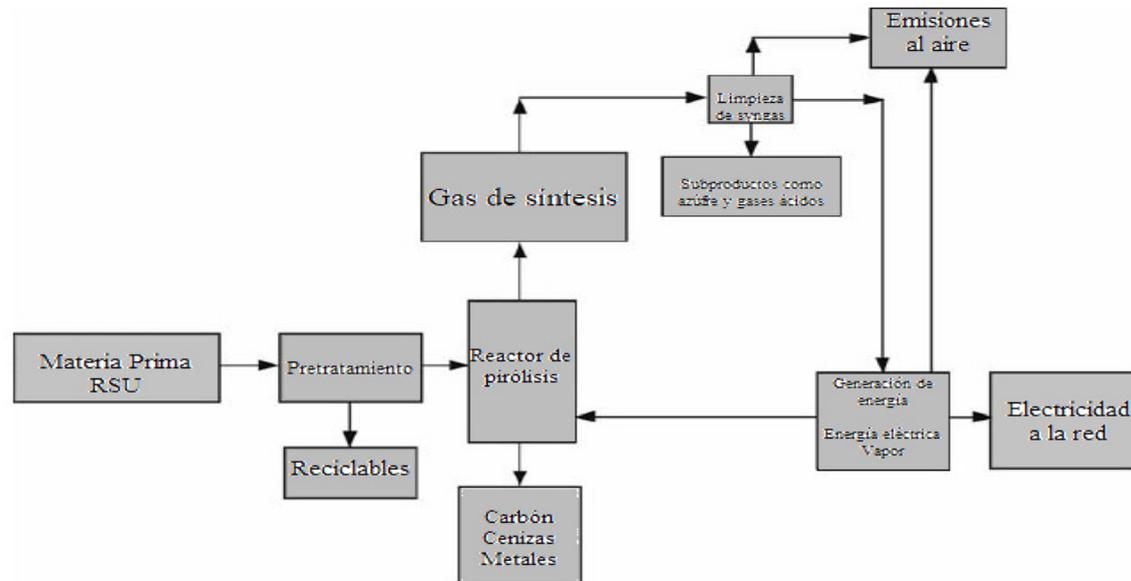


Figura 14. WtE: de RSU a energía a través de la pirólisis (25).

Tecnologías Bioquímicas

Las técnicas bioquímicas empleadas en el tratamiento de desechos orgánicos con el propósito de generar energía se fundamentan en la descomposición de la materia orgánica mediante la actividad microbiana y enzimática, lo que da lugar a la producción de biogás y digestato (22). La DA es el proceso principal, junto con otras tecnologías como la recuperación de gas de vertedero, compostaje, vermicompostaje y celdas de combustible microbianas (29). Estas tecnologías ofrecen ventajas ambientales, producen menos contaminación del aire y generan energía renovable. Sin embargo, también pueden ser más costosas, requerir una operación más compleja y generar emisiones con mal olor.

Digestión anaeróbica

La DA es un proceso microbiano que degrada la materia orgánica en condiciones de ausencia de oxígeno, dando lugar a la producción de biogás y a la formación de digestato estabilizado (24). El biogás contiene aproximadamente un 55-60% de CH_4 y un 30-45% de CO_2 , con trazas de otros gases (42). El biogás puede ser usado como combustible directo o mejorado para obtener biometano similar al gas natural, mientras que el digestato se puede usar como fertilizante orgánico (36). La figura 15 esquematiza el proceso de DA.

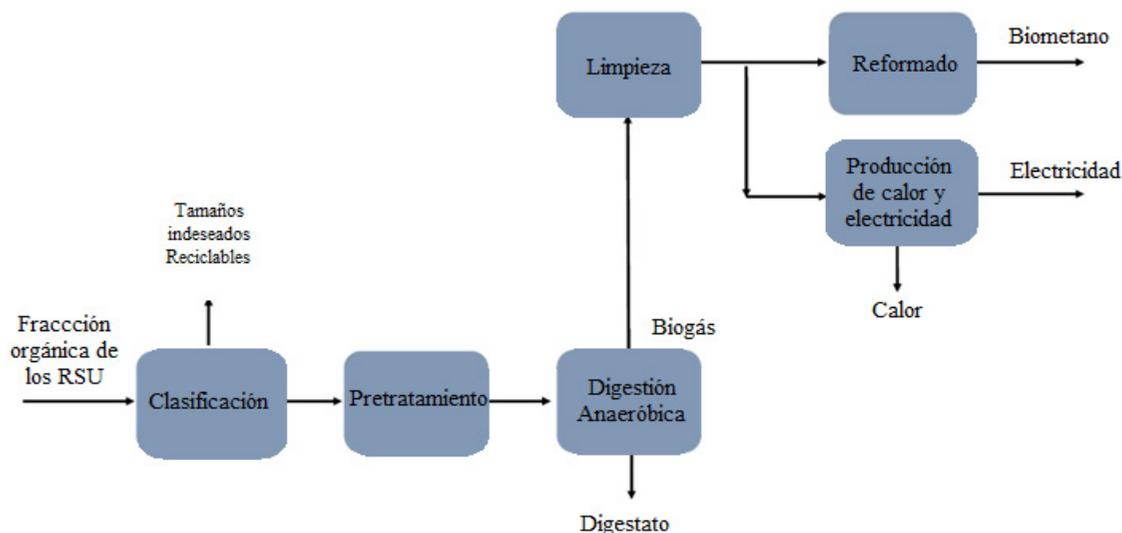


Figura 15. WtE: de RSU a energía a través de la DA (43)

Esta metodología es especialmente útil para residuos con alto porcentaje de humedad (>50%). Durante el proceso, se reduce el volumen total de los residuos alrededor de un 35%, con una reducción de aproximadamente el 70% en la fracción orgánica (42). La densidad del sustrato influye en el rendimiento, siendo los sustratos más densos más biodegradables y conteniendo menos materiales no deseados (44). Parámetros como sólidos totales, sólidos volátiles, nitrógeno de Kjeldahl y pH están relacionados con la producción de biogás (43). El pH óptimo para la DA de RSU es de 6,8-7,2 (27,29). Los porcentajes recomendados de sólidos totales y volátiles en el sustrato oscilan entre 11,4-27% y 15-46,3%, respectivamente (45). La temperatura, generalmente mesofílica (20-40 °C), es crítica en el proceso, aunque la temperatura termofílica (50-65 °C) puede ser más eficiente. La tasa de carga y el tiempo de retención son importantes en el diseño del reactor para maximizar la eficiencia y la carga del digestor (39).

La DA en procesos húmedos es más eficiente en términos de volumen de reactor (46). En comparación con un vertedero, la DA puede producir de 2 a 4 veces más metano en menos tiempo. Se reporta que se generan 2.04 kWh de electricidad por m³ de biogás (39). Aproximadamente, se obtienen 150 kg de metano a partir de 1 tonelada de RSU con un contenido de materia orgánica del 60% y humedad del 40% (27,43). El biogás producido se purifica para eliminar CO₂, agua y otros elementos traza (29), y puede utilizarse directamente para uso doméstico o para generar energía eléctrica. El biogás tiene un alto contenido energético de 20-25 MJ/m³ y emite alrededor de 0.2 kg de CO₂/kWh en la generación eléctrica, lo que indica un bajo potencial de calentamiento global en comparación con la incineración (42). El digestato recupera nutrientes y se puede usar como fertilizante, pero su calidad depende de la materia prima y puede haber limitaciones de uso debido a regulaciones y posibles materiales indeseables (21). Disponer el digestato en un relleno sanitario presenta ventajas, ya que reduce la masa y el volumen de los residuos, inactiva sustancias orgánicas y bioquímicas, reduce los gases emitidos, evita asentamientos y elimina toxinas que podrían contaminar el lixiviado (27).

La DA consta de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Durante la hidrólisis, los compuestos orgánicos complejos se descomponen en moléculas básicas. La acidogénesis descompone los componentes restantes, generando CH₄, CO₂ y amoníaco (NH₃). En la acetogénesis, las moléculas simples se descomponen aún más para producir ácido acético (CH₃COOH), CO₂ y H₂. Finalmente, en la metanogénesis, las bacterias metanogénicas convierten los productos intermedios en CH₄, CO₂ y agua (figura 16). El proceso y sus etapas son descritas con mayor detalle por Barkha Vaish et al., 2016.

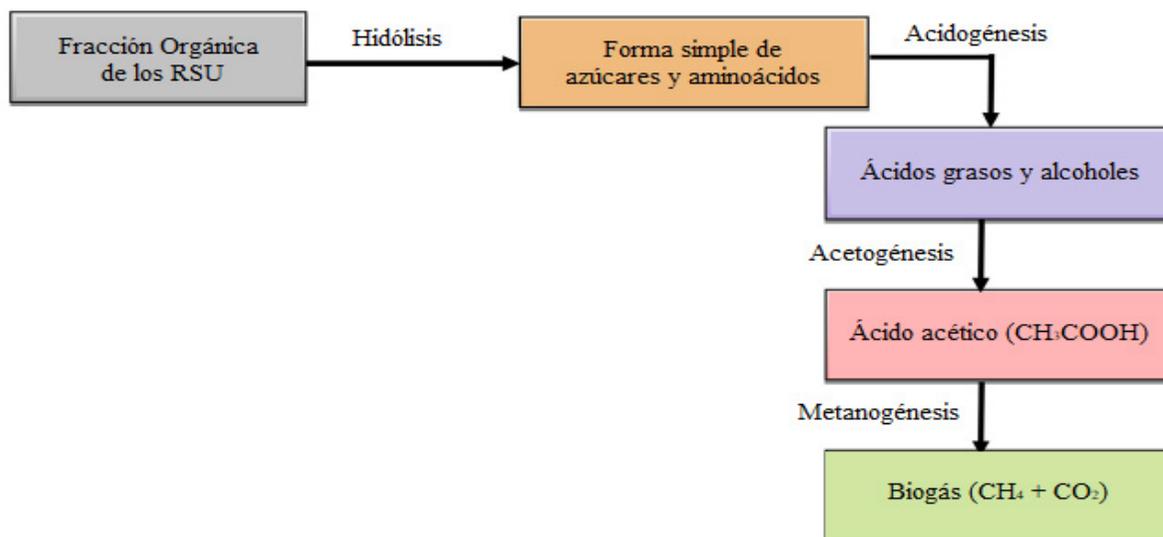


Figura 16. Etapas del proceso de DA (39).

Vertedero con recuperación de gas

La recuperación de gas de vertedero se realiza en vertederos modernos que cumplen normas sanitarias y ambientales. Requieren grandes áreas de terreno, pudiendo ocupar hasta 36 hectáreas. El Reino Unido es líder en esta tecnología, con más de 435 plantas y una capacidad total instalada de 1GWe. Las emisiones de GEI son más altas en comparación con otras tecnologías WtE, con una medida de 1-1.2 kg CO₂/kWh. En países en desarrollo como Colombia, la mayoría de los residuos se disponen en vertederos de forma descontrolada, pero existen oportunidades para capturar gas en grandes vertederos antiguos (26).

La degradación de la materia orgánica en gas de vertedero ocurre en cinco fases: hidrólisis, fermentación, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (34). El gas se extrae de los vertederos y se quema para producir electricidad. La tasa promedio de recuperación de biogás oscila entre 120 y 150 m³/ton, con un valor calorífico de 2.5 MJ/kg. Aunque los costos de capital son bajos, la recuperación de gas de vertedero recibe menos apoyo gubernamental. Se presentan desafíos, como el requerimiento de grandes extensiones de terreno, haciendo referencia a la necesidad de extensas áreas para los rellenos sanitarios. En comparación con otras tecnologías, la extensión de terreno necesaria es significativamente mayor, considerando tanto el espacio para la planta generadora de energía como para el relleno sanitario. Este requisito de mayor espacio se convierte en un factor a tener en cuenta, añadiendo complejidad logística y posiblemente afectando la viabilidad de la tecnología en comparación con alternativas más compactas. Además, se señalan otros desafíos, como el riesgo de combustión espontánea y la contaminación de lixiviados. Estudios indican que es la técnica de tratamiento de residuos a energía menos sostenible (29,34,41).

En Norteamérica, la recuperación de gas de vertedero es la técnica más utilizada entre los tratamientos bioquímicos. Se han implementado mejoras en sistemas como la conversión de residuos en carbones activados y el tratamiento combinado de lixiviados con oxidación secuencial de persulfato y oxidación de Fenton (29). Para maximizar el aprovechamiento del gas, se utilizan sistemas de CHP que convierten el gas en electricidad y calor. En Colombia, se genera aproximadamente 640 kWh a partir de biogás recuperado en el relleno de Doña Juana en Bogotá. Además, se está implementando esta tecnología en Cúcuta para generar 2MW a partir de 851 toneladas diarias de RSU en el relleno Guayabal (11).

Biorrefinerías integradas de RSU

Las biorrefinerías mencionadas en la tercera sección se basan en un solo proceso de conversión para producir principalmente combustibles, sin embargo, existen aplicaciones para los RSU en la generación de productos químicos y materiales de origen biológico, como bioplásticos, para

enfrentar las preocupaciones sobre el impacto ambiental, la disponibilidad y el alto costo del petróleo y sus productos derivados (47). Las biorrefinerías se consideran un instrumento clave para lograr los objetivos de la bioeconomía y promover la transición lineal a circular. La contribución fundamental de las biorrefinerías integradas al concepto de economía circular se basa en su capacidad para transformar biomasa en diferentes productos finales con alto valor añadido (48–50).

Las biorrefinerías de RSU son instalaciones que integran diversas tecnologías WtE. La fracción orgánica de los RSU (FORSU) están compuestos principalmente por carbohidratos, proteínas y lípidos, que representan materias primas de alto potencial para la creación de productos valiosos (48). Estas instalaciones utilizan una combinación de procesos y tratamientos biológicos, químicos y físicos específicos para tratar diferentes fracciones de los RSU y obtener productos distintos (21,50,51). Sin embargo, existen barreras técnicas, financieras y de conciencia social que deben superarse, para esto se requiere una mayor inversión en infraestructura, estímulos para fomentar la innovación tecnológica y el impulso de la industrialización (49). Las biorrefinerías de residuos deben apuntar a una explotación versátil de los FORSU como materia prima de acuerdo con su naturaleza y composición. Por lo tanto, es necesario identificar las demandas industriales más importantes, así como las sinergias necesarias que permitan el diseño de una instalación versátil y eficiente (52).

La integración de diversas tecnologías WtE en las biorrefinerías reduce costos. La técnica de pirólisis para producir aceite líquido es especialmente ventajosa en refinerías de petróleo existentes. Al aprovechar su infraestructura y recursos disponibles, se optimiza la producción de aceite líquido y se maximiza la eficiencia del proceso de conversión en las biorrefinerías (53).

La primera biorrefinería integrada del mundo, iniciada en 2003 en colaboración entre el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, EE.UU) y DuPont, marcó el comienzo de numerosos proyectos similares en diferentes partes del mundo para obtener productos de valor agregado (54). Uno de los hitos actuales es la biorrefinería URBIOFIN, que demuestra la viabilidad técnico-económica y ambiental de convertir los RSU en diversos productos valiosos (52).

Planta integrada URBIOFIN

La planta Urban Biorefinery for Innovative Fuels (URBIOFIN) es una biorrefinería de demostración a escala semi-industrial que se ha desarrollado como una iniciativa conjunta de investigación público-privada en la Unión Europea. Su objetivo principal es transformar la fracción orgánica de los FORSU en diversos productos biobasados, contribuyendo así a la transición hacia una economía circular (48).

La planta URBIOFIN es una colaboración entre 16 empresas europeas, universidades y centros de investigación, con un presupuesto de 15 millones de euros. Utiliza procesos fisicoquímicos y biológicos en tres etapas principales. En la primera etapa, los RSU se clasifican en FORSU y componentes no orgánicos reciclables. En la segunda etapa, se convierte parte de la FORSU en bioetanol, que puede ser transformado en bioetileno para la maduración de frutas. Otra fracción de FORSU se convierte en ácidos grasos volátiles (AGV) utilizados para producir biopolímeros llamados polihidroxialcanoatos (PHA) con aplicaciones en envasado y agricultura. En la tercera etapa, el digestato se somete a una biotransformación anaeróbica para producir biogás, que se mejora para obtener biometano. Durante este proceso, también se generan microalgas utilizadas como biofertilizantes.

La planta URBIOFIN transforma 10 toneladas diarias de FORSU, validando la sostenibilidad técnica, ambiental y económica de estas tecnologías. Involucra a todos los actores de la cadena de valor y ejemplifica cómo una biorrefinería de residuos urbanos puede mejorar la gestión de los residuos sólidos, aprovechando su potencial como materia prima para productos biobasados de alto valor. Además, contribuye a la implementación de una economía circular en la Unión Europea y responde a la creciente demanda de productos basados en biomasa en lugar de derivados del petróleo (48).

Por otro lado, se han realizado estudios en países en desarrollo sobre la implementación de biorrefinerías integradas. Nizami, Shahzad, et al., (2017) evaluaron el potencial de una biorrefinería integrada de residuos en la ciudad de Makkah, Arabia Saudita. Durante el Ramadán y el Hajj, se generan alrededor de 20 mil y 70 mil toneladas de residuos sólidos municipales por día, respectivamente. La propuesta de biorrefinería podría tratar aproximadamente el 87,8% de los residuos generados, con el 12,2% destinado al reciclaje. Además de la recuperación de productos

valiosos, se estima que la biorrefinería podría generar ahorros económicos y ambientales significativos, desvió de vertederos y generación de electricidad por 141,4 millones de dólares, y ahorro de 1,95 millones de barriles de petróleo y 11,2 millones de m³ de gas natural.

Las biorrefinerías integradas de RSU enfrentan desafíos económicos y técnicos en países en desarrollo. La rentabilidad económica se ve afectada por la variabilidad de los residuos y los altos costos de implementación. La falta de infraestructura y recursos financieros también limita la capacidad de construir y operar estas instalaciones. Además, la escasez de conocimientos técnicos dificulta la selección de procesos eficientes. Se requiere aumento en la inversión en actividades de investigación y desarrollo, así como políticas favorables y colaboración entre los sectores académico, industrial y gubernamental para superar estos desafíos en países como Colombia.

Para considerar la biorrefinación de residuos es necesario tener un conocimiento sólido sobre el origen y la cantidad de residuos generados, así como la capacidad de reciclaje y reutilización. También se deben tener en cuenta los aspectos relacionados con la gestión y valorización de residuos, el transporte adecuado y los riesgos asociados. Otros factores importantes incluyen la gestión del agua, la participación de las ciudades, la conexión entre la investigación y el desarrollo, y la creación de un marco regulatorio flexible (55).

Contexto colombiano

Colombia tiene un notable potencial en la producción de energía a partir de sus RSU. La población produce anualmente 14 millones de toneladas de residuos residenciales, con un promedio de 0.77 kg por persona al día (56). Aunque solo se recicla el 15% de los residuos, se han realizado pocos esfuerzos para aprovechar los RSU en el país. Es necesario un enfoque integral y colaborativo entre el gobierno, la industria y la sociedad civil para abordar eficazmente este problema y avanzar hacia una gestión más sostenible (57).

El 83% de los RSU en Colombia se dispone en rellenos sanitarios, lo que plantea desafíos debido a la falta de disponibilidad de nuevos sitios de disposición (58). Por otra parte, la diversificación de la matriz energética es crucial, ya que actualmente el 81% se basa en hidroeléctricas, el 17% en combustibles fósiles y solo el 1% en biomasa. Los fenómenos climáticos como "El Niño" afectan la capacidad de generación de energía hidroeléctrica, lo que aumenta el precio de la electricidad durante las temporadas secas (59); Además, la escasez de reservas de gas natural y petróleo pone en riesgo la economía del país. Es imperativo explorar alternativas para la gestión de residuos y la generación de energía en Colombia para abordar estos desafíos y garantizar una mayor seguridad energética (60).

En Colombia los RSU tienen una composición promedio de 61.5% de residuos orgánicos, 10.39% de cartón y papel, 1.41% de metales, 4.05% de vidrio, 10.67% de plásticos y 12.67% de otros residuos e inertes. El contenido de humedad de los RSU es generalmente superior al 50%, con una relación C/N entre 25-30 en la fracción orgánica y un poder calorífico de 700-1600 kcal/kg (43,56,61). Estas características varían según la región debido a factores como el clima, el nivel de desarrollo económico y las prácticas de manejo de residuos. En países como Perú, Suriname, Guatemala y Brasil, se emplean tecnologías como la incineración, la DA y la recuperación de gas en rellenos sanitarios (Margallo et al., 2019). Sin embargo, en Colombia, el alto contenido de humedad de los RSU dificulta la eficiencia de las tecnologías termoquímicas, como la incineración, debido al consumo de energía necesario para la evaporación del agua. Por lo tanto, se requieren estudios específicos del sitio para determinar la mejor opción de gestión de residuos en cada caso (43).

La Isla de San Andrés enfrenta problemas debido al agotamiento del relleno sanitario Magic Garden. Para abordar esta situación, se construyó en 2012 la Planta RSU, que utiliza una máquina de pulpo y una banda transportadora para llevar los RSU a dos cámaras de combustión rotativas, donde se queman a 850°C. Los gases resultantes se dirigen a un sistema de calderas diseñado para producir vapor, el cual se lleva a turbinas y produce electricidad. Después de este proceso, los gases se enfrían y se filtran a través de filtros de manga. La capacidad de la planta es de 52,5 toneladas por día, con una generación esperada de 1,2 MW. Sin embargo, la planta ha enfrentado desafíos en infraestructura, financiamiento, conocimiento técnico y aspectos socioeconómicos y culturales, lo que ha impedido su entrada en funcionamiento. Se han realizado inversiones

significativas, pero aún hay obstáculos por superar (11,62). La incineración como opción de gestión de residuos requiere una cuidadosa evaluación técnica y económica (63,64).

Recientemente se canceló en Bogotá un proyecto en etapa de licitación para la construcción de una planta de termovalorización que utilizaría incineración para transformar 1,800 toneladas diarias de residuos en aproximadamente 8.5 MW de energía eléctrica. La cancelación se debió a condiciones financieras y económicas cambiantes, como el aumento del dólar, las tasas de interés y el incremento en el costo de las materias primas (65,66).

A excepción de la recuperación de gas de vertedero en dos sitios mencionados en la sección 3, no existen plantas en operación en el país para la recuperación de energía a partir de RSU.

Resultados

En el complejo escenario de la gestión de RSU en Colombia la elección de tecnologías para la conversión en energía debe abordarse con una perspectiva integral y objetiva. Si bien la Digestión Anaerobia se perfila como una alternativa potencialmente adecuada, se reconoce que esta tecnología está diseñada principalmente para la fracción orgánica biodegradable de los RSU.

Es crucial subrayar que la elección de tecnologías debe basarse en estudios específicos que consideren la variabilidad de los RSU colombianos. La composición heterogénea de los RSU recolectados de forma mixta implica que ciertas tecnologías, como la incineración, son aplicables, mientras que otras, como la gasificación, la pirólisis y la aplicación directa de la DA, no son viables en su estado bruto. Aquí se destaca la existencia de tratamientos intermedios, como las plantas de tratamiento mecánico, que separan la materia orgánica para compostaje o biometanización, además de la selección de otros materiales para reciclaje.

La DA emerge como una opción atractiva, no porque sea la única, sino por su versatilidad y capacidad para integrarse en diferentes escalas de operación. Es esencial tener en cuenta que el proceso de gestión de RSU no sigue una única vía, y la DA puede insertarse de manera efectiva en este flujo, contribuyendo al avance hacia sistemas más sostenibles. La variabilidad en los RSU y la necesidad de tratamientos adaptativos hacen que la elección de tecnologías deba ser dinámica y específica para cada caso. La presente discusión no busca establecer la DA como la única opción viable, sino más bien resaltar su idoneidad en el panorama colombiano.

Discusión

En esta sección se examinan los hallazgos sobresalientes derivados de la revisión exhaustiva de la literatura relacionada con las tecnologías de valorización de RSU en el contexto colombiano. Se abordan los factores económicos, sociales y ambientales que emergen de estos estudios y se presentan conclusiones que permiten una visión general y orientación en la gestión sostenible de los residuos en el país.

Estrategias priorizadas para la valorización de residuos en el marco Colombiano

Factores económicos:

La incineración emerge como una opción con una inversión de capital significativa, atribuida a la prevalencia de RSU orgánicos y su bajo valor calorífico. Aunque promete un ingreso neto superior en comparación con otras tecnologías, los desafíos se plantean en la inversión inicial y los costos sostenidos de mantenimiento en el contexto colombiano. Contrariamente, la gasificación se destaca en algunos estudios en comparación con la incineración, ya que el gas de síntesis ofrece aplicaciones versátiles y contribuye a la reducción de contaminantes atmosféricos (67). No obstante, es esencial señalar que la gasificación implica una inversión considerable para lograr una eficiente recuperación de energía mediante la limpieza del gas.

En otro sentido, la pirólisis presenta un valor calorífico neto adecuado para la producción de combustible líquido, pero demanda una fuente adicional de calor para mantener la temperatura del proceso, resultando en costos de inversión y operativos más elevados en comparación con la DA (68). Desde una perspectiva económica, la DA se destaca entre las tecnologías mencionadas debido a sus costos de capital y operativos más bajos, además de operar a una temperatura

más moderada. La DA no solo genera biogás con un valor calorífico sustancial, sino que también transforma los subproductos en fertilizantes, aumentando su valor agregado. Estudios de viabilidad recientes realizados en Colombia respaldan la adopción de la DA como una alternativa preferible en el tratamiento de RSU (43). Es crucial señalar que, a pesar de que la recuperación de gas de vertedero puede reducir las emisiones de CH_4 , no se considera la opción más rentable a largo plazo debido a sus grandes requerimientos de terreno para su funcionamiento (69).

Factores sociales

Las tecnologías de conversión de RSU pueden impactar de manera diversa en las comunidades locales, con niveles variables de aceptación. La incineración, por ejemplo, podría ser percibida positivamente debido a la reducción del volumen de residuos y la generación de empleo en las áreas circundantes a las plantas de incineración. Sin embargo, enfrenta preocupaciones sustanciales en términos de salud y medio ambiente debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos y partículas finas, lo que comúnmente genera oposición de las comunidades locales (70). De manera similar, la gasificación, al igual que la incineración, podría ser bien recibida por la reducción de residuos y la generación de empleo. No obstante, la inversión inicial necesaria para establecer instalaciones de gasificación puede limitar su adopción y aceptación social en algunas comunidades.

La pirólisis, al generar empleo en áreas circundantes, podría ser vista de manera positiva en términos sociales. Sin embargo, sus costos operativos más elevados en comparación con algunas otras tecnologías pueden afectar su viabilidad y aceptación social. En cuanto a la DA, al tener un menor impacto en la salud pública y producir fertilizantes como subproducto, podría ser aceptada de manera positiva por las comunidades locales. No obstante, la necesidad de un control y gestión precisos puede aumentar los costos y la complejidad de la operación, lo que podría influir en su aceptación social.

Es esencial destacar que los vertederos a menudo son considerados fuentes de contaminación y problemas ambientales, y las plantas de recuperación de gas de vertedero pueden generar impactos visuales y olfativos en áreas cercanas, generando preocupación y oposición de las comunidades locales (71). La aceptación social de las tecnologías de conversión de RSU varía según la ubicación y las condiciones locales. Este estudio, aunque no pretende seleccionar una tecnología específica, proporciona valiosas perspectivas para priorizar en términos generales y ofrece consideraciones esenciales para el desarrollo de proyectos relacionados con la gestión de residuos.

Factores ambientales

Las diversas tecnologías de conversión de RSU presentan impactos ambientales diversos. Por ejemplo, la incineración reduce significativamente el volumen de residuos, pero emite contaminantes atmosféricos como SO_x , NO_x y CO_x , contribuyendo al calentamiento global y la contaminación del aire. Las cenizas resultantes pueden contener metales pesados y otros contaminantes que requieren una gestión adecuada. Además, la incineración genera dioxinas carcinogénicas y niveles de ruido más altos en comparación con otras tecnologías (72).

En contraste, la pirólisis, cuando se implementa correctamente, tiende a generar menos emisiones perjudiciales para la calidad del aire. Sin embargo, es posible que se produzcan compuestos volátiles dañinos y gases de combustión con cloro y azufre que requieren un manejo adecuado. La gasificación presenta ventajas, como una mayor reducción del volumen de residuos, pero puede generar gases con alquitranes, partículas, halógenos, metales pesados y compuestos alcalinos, teniendo potenciales impactos negativos en el ambiente y la salud humana (45).

Por otro lado, la Digestión Anaerobia emite menos CO_2 y requiere menos espacio. También puede reducir los impactos ambientales, como el Potencial de Calentamiento Global y la Eutrofización de Agua Dulce, más que otras tecnologías (73). Sin embargo, la DA enfrenta desafíos relacionados con la variabilidad en la composición de los RSU y la necesidad de un control y gestión precisos para mantener condiciones óptimas de digestión, lo que puede influir en su eficiencia y rendimiento ambiental.

En cuanto a la recuperación de gas de vertedero, presenta un beneficio ambiental al reducir las emisiones de metano a la atmósfera. Sin embargo, la eficiencia de la captura de gas puede variar según la edad y composición de los vertederos, afectando su rendimiento en la reducción de

emisiones. Además, la gestión adecuada de los subproductos, como el lixiviado y las cenizas, es esencial para evitar la contaminación del suelo y el agua circundante. Aunque la recuperación de gas de vertedero requiere grandes extensiones de tierra para funcionar, lo que la hace menos deseable en términos ambientales.

Conclusiones relacionadas en la literatura

Los análisis presentados en la literatura científica ofrecen una visión valiosa de las tecnologías de valorización de RSU en Colombia. Al revisar críticamente estos estudios, se destacan consideraciones clave que afectan la aplicabilidad local y la toma de decisiones específicas. Alzate et al, encontraron que todas las tecnologías generan ingresos positivos, pero los altos costos de inversión y los ingresos por tonelada de residuos y venta de electricidad afectan los resultados y concluyen que se requieren precios especiales de venta de energía e incentivos fiscales para asegurar la competitividad en el mercado eléctrico. Montiel-Bohórquez et al, evaluaron la implementación de una planta de gasificación por plasma combinada con ciclo de vapor, y encontraron que altas temperaturas de plasma y bajas temperaturas de reactor mejoran la eficiencia de la planta, que puede generar 67.8 MW de potencia mecánica y 56 MW de potencia eléctrica neta y concluyen que se requieren estrategias como tarifas más altas para la entrada de residuos y la venta de subproductos. I. Khan & Kabir evaluaron la sostenibilidad de 4 tecnologías en el contexto de países en desarrollo y encontraron que la DA y la incineración son las opciones más y menos sostenibles, respectivamente, mientras que la gasificación y la pirólisis se encuentran en segundo y tercer lugar; la DA se encontró ser la más económica y la más sostenible en términos sociales, seguida de la pirólisis. (74) estudiaron la incineración y la recuperación de gas de vertedero y encontraron que la incineración tiene mayor potencial de generación eléctrica y reducción de emisiones de GEI. Afanador et al., en el 2022 realizaron simulaciones de tres procesos de conversión térmica de residuos plásticos, concluyeron que la gasificación y la pirólisis son tecnologías prometedoras para el manejo de residuos en Bucaramanga, Colombia.

Conclusiones

Basado en la revisión sistemática y el análisis bibliométrico de tecnologías WtE con un enfoque en el contexto colombiano, se obtienen las siguientes conclusiones:

La variabilidad en la composición de los RSU en Colombia presenta un desafío significativo, requiriendo enfoques flexibles y tecnologías adaptativas para su tratamiento. La selección de tecnologías debe considerar la naturaleza heterogénea de los residuos recolectados de manera mixta.

A pesar de la viabilidad técnica de alternativas como la incineración, gasificación y pirólisis, la Digestión Anaerobia se presenta como una opción atractiva en el contexto colombiano. Su aplicabilidad a diferentes escalas y la capacidad para gestionar residuos con un alto contenido de humedad y baja calidad son aspectos destacados.

La falta de información específica sobre la composición y características de los RSU en Colombia subraya la necesidad de investigaciones adicionales. Estudios específicos que aborden las peculiaridades de los residuos en la región son esenciales para una toma de decisiones fundamentada.

La transición hacia vertederos avanzados, junto con la eliminación de vertederos a cielo abierto, se percibe como una estrategia valiosa. Sin embargo, se enfatiza la importancia de implementar incentivos y subsidios para abordar los costos asociados con estas tecnologías.

La elección de tecnologías de valorización debe ser dinámica y adaptativa, considerando la variabilidad en la composición de los RSU y la necesidad de tratamientos específicos. La recolección selectiva en origen y la jerarquía de residuos deben ser aspectos centrales en las estrategias de gestión.

Las biorrefinerías integradas de RSU presentan potencial para el tratamiento de RSU, pero aún se encuentran en una etapa inicial de desarrollo en Colombia. No obstante, es esencial promover la investigación y la colaboración multidisciplinaria para evaluar la viabilidad de integrar múltiples tecnologías en biorrefinerías de RSU.

En última instancia, la promoción de sistemas de gestión de residuos más sostenibles en Colombia depende de una cuidadosa evaluación de las opciones disponibles y de un enfoque equilibrado que considere los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales. El camino hacia un futuro más sostenible en la gestión de residuos implica un compromiso continuo con la investigación, la innovación y la colaboración multidisciplinaria en busca de soluciones óptimas para el contexto colombiano.

Referencias

1. The World Bank. More Growth, Less Garbage. World Bank Publications [Internet]. 2021; Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2174>.
2. Kaza S, Yao L, Bhada-Tata P, Van Woerden F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 [Internet]. Urban Development Series. Washington, DC.; 2018. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
3. Kawai K, Tasaki T. Revisiting estimates of municipal solid waste generation per capita and their reliability. *J Mater Cycles Waste Manag.* 2016;18(1):1–13.
4. OCDE. 2022. 2022. Municipal waste (indicador).
5. Cortés CM. Estudio de los residuos sólidos en Colombia. 1ra ed. Bogotá: Universidad Externado de Colombia. Biblioteca. EAP.; 2018. 246 páginas.
6. Cheng H, Hu Y. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresour Technol* [Internet]. 2010;101(11):3816–24. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.040>
7. Nizami AS, Shahzad K, Rehan M, Ouda OKM, Khan MZ, Ismail IMI, et al. Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. *Appl Energy* [Internet]. 2017;186:189–96. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.116>
8. Global Methane Initiative. Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities [Internet]. Vol. 2020, Global Methane Initiative. 2020. Disponible en: <https://www.globalmethane.org/documents/gmi-mitigation-factsheet.pdf>
9. Park JW, Shin HC. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. *Atmos Environ.* 2001;35(20):3445–51.
10. Kjeldsen P, Barlaz MA, Rooker AP, Baun A, Ledin A, Christensen TH, et al. Technology Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate : A Review Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate : A Review. 2010;3389.
11. Superservicios. Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020. 2021.
12. UNEP. Informe anual 2022 [Internet]. Nairobi, Kenya; 2022 [citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en: [unep.org/annualreport/es](https://www.unep.org/annualreport/es)
13. Hirsch JE. An index to quantify an individual's scientific research output [Internet]. 2005. Disponible en: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0507655102
14. Kumar A, Samadder SR. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. Vol. 69, *Waste Management*. Elsevier Ltd; 2017. p. 407–22.
15. Dulla N, priyadarshini S, Mishra S, Swain SC. Global Exploration on Bibliometric Research Articles: A Bibliometric Analysis. *Library Philosophy and Practice.* 2021;2021:1–26.
16. Liu CY, Wang JC. Forecasting the development of the biped robot walking technique in Japan through S-curve model analysis. *Scientometrics.* 2010;82(1):21–36.

17. Meyer PS, Yung JW, Ausubel JH. A Primer on Logistic Growth and Substitution The Mathematics of the Loglet Lab Software [Internet]. 1999. Disponible en: <http://phe.rockefeller.edu>
18. Cucchiella F, D'Adamo I, Gastaldi M. Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill. *Energy Convers Manag*. el 1 de enero de 2017;131:18–31.
19. Consonni S, Lombardi L, Viganò F. Municipal Solid Waste to Energy Technology. En: *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. Elsevier; 2017. p. 389–401.
20. Afanador JP, Bonilla IL, Kafarov V V., León-Esteban AF, Carreño L V. Plastic Waste to Energy, Technology Solutions Based on Sustainability Criteria for Medium Size City in Latin America, Considering COVID-19 Pandemic. *Chem Eng Trans*. 2022;94:475–80.
21. Yaashikaa PR, Kumar PS, Saravanan A, Varjani S, Ramamurthy R. Bioconversion of municipal solid waste into bio-based products: A review on valorisation and sustainable approach for circular bioeconomy. *Science of the Total Environment*. el 15 de diciembre de 2020;748.
22. Silva-Martínez RD, Sanches-Pereira A, Ortiz W, Gómez Galindo MF, Coelho ST. The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: Challenges and opportunities. *Renew Energy*. el 1 de agosto de 2020;156:509–25.
23. Matsakas L, Gao Q, Jansson S, Rova U, Christakopoulos P. Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. Vol. 26, *Electronic Journal of Biotechnology*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso; 2017. p. 69–83.
24. Nanda S, Berruti F. A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste. *J Hazard Mater*. el 5 de febrero de 2021;403.
25. Di Matteo U, Nastasi B, Albo A, Astiaso Garcia D. Energy contribution of OFMSW (Organic Fraction of Municipal Solid Waste) to energy-environmental sustainability in urban areas at small scale. *Energies (Basel)*. el 9 de febrero de 2017;10(2).
26. Yap HY, Nixon JD. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. *Waste Management*. el 1 de diciembre de 2015;46:265–77.
27. Barkha Vaish, Abhijit Sarkar, Pooja Singh, Prabhat Kumar Singh, Chandan Sengupta, Rajeev Pratap Singh. *Prospects of Biomethanation in Indian Urban Solid Waste: Stepping Towards a Sustainable Future*. Springer Science+Business Media. 2016;(Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes).
28. Xu S, He H, Luo L. Status and Prospects of Municipal Solid Waste to Energy Technologies in China. 2016;31–54.
29. Mukherjee C, Denney J, Mbonimpa EG, Slagley J, Bhowmik R. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. Vol. 119, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2020.
30. Bosmans A, Vanderreydt I, Geysen D, Helsen L. The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: A technology review. *J Clean Prod*. el 15 de septiembre de 2013;55:10–23.
31. Tabasová A, Kropáč J, Kermes V, Nemet A, Stehlík P. Waste-to-energy technologies: Impact on environment. *Energy*. 2012;44(1):146–55.
32. Shareefdeen Z, Elkamel A, Tse S. Review of current technologies used in municipal solid waste-to-energy facilities in Canada. Vol. 17, *Clean Technologies and Environmental Policy*. Springer Verlag; 2015. p. 1837–46.
33. Lombardi L, Carnevale E, Corti A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management*. el 1 de marzo de 2015;37:26–44.

34. Alzate-Arias S, Jaramillo-Duque Á, Villada F, Restrepo-Cuestas B. Assessment of government incentives for energy from waste in Colombia. *Sustainability (Switzerland)*. el 23 de abril de 2018;10(4).
35. Paethanom A, Nakahara S, Kobayashi M, Prawisudha P, Yoshikawa K. Performance of tar removal by absorption and adsorption for biomass gasification. *Fuel Processing Technology*. diciembre de 2012;104:144–54.
36. Christoforou E, Fokaides PA. A review of olive mill solid wastes to energy utilization techniques. Vol. 49, *Waste Management*. Elsevier Ltd; 2016. p. 346–63.
37. Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*. abril de 2012;32(4):625–39.
38. González WA, Zimmermann F, Pérez JF. Thermodynamic assessment of the fixed-bed downdraft gasification process of fallen leaves pelletized with glycerol as binder. *Case Studies in Thermal Engineering*. el 1 de septiembre de 2019;14.
39. Chand Malav L, Yadav KK, Gupta N, Kumar S, Sharma GK, Krishnan S, et al. A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities. *J Clean Prod*. el 20 de diciembre de 2020;277.
40. Nizami AS, Shahzad K, Rehan M, Ouda OKM, Khan MZ, Ismail IMI, et al. Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. *Appl Energy*. el 15 de enero de 2017;186:189–96.
41. Khan I, Kabir Z. Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria analysis for sustainability assessment. *Renew Energy*. el 1 de mayo de 2020;150:320–33.
42. Parthiba O, Kirsten K, Subramanian H, Muthu S. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes Recycling of Solid Waste for Biofuels and Bio-chemicals [Internet]. 2016. Disponible en: <http://www.springer.com/series/13340>
43. Fernanda F, García F, Fernanda M, Galindo -Universidad G, Rosario D, Cherni JA. Assessment of a comprehensive municipal waste-to-energy dry anaerobic digestion process for the province of Sabana Centro (Colombia) combining technical and participatory approaches. 2022.
44. Mao C, Feng Y, Wang X, Ren G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews [Internet]*. 2015;45:540–55. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
45. Yi J, Dong B, Jin J, Dai X. Effect of increasing total solids contents on anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: Performance and microbial characteristics analysis. *PLoS One*. el 22 de julio de 2014;9(7).
46. Li Y, Park SY, Zhu J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(1):821–6.
47. Atabani AE, Tyagi VK, Fongaro G, Treichel H, Pugazhendhi A, Hoang AT. Integrated biorefineries, circular bio-economy, and valorization of organic waste streams with respect to bio-products. Vol. 12, *Biomass Conversion and Biorefinery*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2022. p. 565.
48. Pérez V, Pascual A, Rodrigo A, García Torreiro M, Latorre-Sánchez M, Coll Lozano C, et al. Integrated innovative biorefinery for the transformation of municipal solid waste into biobased products. En: *Waste Biorefinery*. Elsevier; 2020. p. 41–80.
49. Duan Y, Pandey A, Zhang Z, Awasthi MK, Bhatia SK, Taherzadeh MJ. Organic solid waste biorefinery: Sustainable strategy for emerging circular bioeconomy in China. *Ind Crops Prod*. el 1 de octubre de 2020;153.

50. Caldeira C, Vlysidis A, Fiore G, De Laurentiis V, Vignali G, Sala S. Sustainability of food waste biorefinery: A review on valorisation pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment. *Bioresour Technol.* el 1 de septiembre de 2020;312.
51. Nizami AS, Rehan M, Ouda OKM, Shahzad K, Sadeef Y, Iqbal T, et al. An argument for developing waste-to-energy technologies in Saudi Arabia. *Chem Eng Trans.* el 1 de octubre de 2015;45:337–42.
52. Khan MU, Ahring B, Garcia-Perez T, Garcia-Perez M. Valorization of municipal solid waste in biorefineries for the creation of a circular economy: Role of emerging technologies. En: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Sustainable Bioresources for the Emerging Bioeconomy.* Elsevier; 2020. p. 323–47.
53. Nizami AS, Rehan M, Waqas M, Naqvi M, Ouda OKM, Shahzad K, et al. Bioresource Technology Waste biorefineries : Enabling circular economies in developing countries. *Bioresour Technol* [Internet]. 2017;241:1101–17. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.097>
54. Ismail IM, Nizami A sattar. WASTE-BASED BIOREFINERIES IN DEVELOPING COUNTRIES : AN. 2016;2025.
55. Venkata Mohan S, Dahiya S, Amulya K, Katakojwala R, Vanitha TK. Can circular bioeconomy be fueled by waste biorefineries — A closer look. *Bioresour Technol Rep.* el 1 de septiembre de 2019;7.
56. Holland Circular Hotspot, Huisman H, Keesman B, Breukers L. Waste Management Country Report: Colombia [Internet]. 2021 feb [citado el 29 de mayo de 2023]. Disponible en: www.hollandcircularhotspot.nl
57. World Bank. Colombia: Municipal solid waste management. Washington, DC; 2018.
58. UAESP. Informe de Gestión de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. Bogotá D.C.; 2022.
59. Sagastume Gutiérrez A, Cabello Eras JJ, Hens L, Vandecasteele C. The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. *J Clean Prod.* el 1 de octubre de 2020;269.
60. Montiel-Bohórquez ND, Pérez JF. Energy generation from municipal solid waste. Thermodynamic strategies to optimize the performance of thermal power plants. *Informacion Tecnologica.* el 1 de febrero de 2019;30(1):273–83.
61. DANE. Boletín Técnico: Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales –residuos sólidos. 2018 ago.
62. Torres F, Ontiveros M, Donoso M. Estudio de Caso: San Andrés Colombia. 10 años de un incinerador sin estrenar y una isla que se desborda en residuos. 2021.
63. Bottausci S, Midence R, Serrano-Bernardo F, Bonoli A. Organic Waste Management and Circular Bioeconomy: A Literature Review Comparison between Latin America and the European Union. Vol. 14, *Sustainability (Switzerland).* MDPI; 2022.
64. Margallo M, Ziegler-Rodriguez K, Vázquez-Rowe I, Aldaco R, Irabien Á, Kahhat R. Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. Vol. 689, *Science of the Total Environment.* Elsevier B.V.; 2019. p. 1255–75.
65. UAESP. Planta de Termovalorización. 2022.
66. El Tiempo. El Tiempo. 2022. Bogotá ya no tendrá una planta de termovalorización en Doña Juana.

67. Zhao X gang, Jiang G wu, Li A, Wang L. Economic analysis of waste-to-energy industry in China. *Waste Management*. el 1 de febrero de 2016;48:604–18.
68. Leme MMV, Rocha MH, Lora EES, Venturini OJ, Lopes BM, Ferreira CH. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *Resour Conserv Recycl*. 2014;87:8–20.
69. Appels L, Lauwers J, Degreve J, Helsen L, Lievens B, Willems K, et al. Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 2011;15(9):4295–301. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.121>
70. Dong J, Tang Y, Nzihou A, Chi Y, Weiss-Hortala E, Ni M. Life cycle assessment of pyrolysis, gasification and incineration waste-to-energy technologies: Theoretical analysis and case study of commercial plants. *Science of the Total Environment*. el 1 de junio de 2018;626:744–53.
71. Shams S, Sahu JN, Rahman SMS, Ahsan A. Sustainable waste management policy in Bangladesh for reduction of greenhouse gases. *Sustain Cities Soc*. el 1 de agosto de 2017;33:18–26.
72. Espinoza Pérez L, Ziegler-Rodríguez K, Espinoza Pérez AT, Vásquez ÓC, Vázquez-Rowe I. Closing the gap in the municipal solid waste management between metropolitan and regional cities from developing countries: A life cycle assessment approach. *Waste Management*. el 1 de abril de 2021;124:314–24.
73. Astrup TF, Tonini D, Turconi R, Boldrin A. Life cycle assessment of thermal Waste-to-Energy technologies: Review and recommendations. *Waste Management*. el 1 de marzo de 2015;37:104–15.
74. Islam KMN. Municipal solid waste to energy generation: An approach for enhancing climate co-benefits in the urban areas of Bangladesh. Vol. 81, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2018. p. 2472–86.