
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS WASTE-TO-ENERGY (WtE), PANORAMA GLOBAL Y PERSPECTIVAS EN PANAMÁ*

Andy Espinoza H.¹

* DOI: <https://doi.org/10.18601/01245996.v27n52.15>. Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de agencias de financiación del sector público, comercial o sin fines de lucro. Recepción: 01-04-2024, modificación final: 28-11-2024, aceptación: 02-12-2024. Sugerencia de citación: Espinoza H., A. (2024). Generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) mediante el uso de tecnologías Waste-to-Energy (WtE): Panorama global y perspectivas en Panamá. *Revista de Economía Institucional*, 27(52), 411-429.

¹ Doctor en Humanidades y Ciencias Sociales Universidad de Panamá, Director de la Escuela de Administración Marítima, docente e investigador, Universidad Marítima Internacional de Panamá (UMIP), FATRAMAR. Miembro del Sistema Nacional de Investigación (SNI) de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), Panamá, Panamá, [aespinoza@umip.ac.pa], [<https://orcid.org/0000-0003-1258-6056>].

Generación de Energía Eléctrica a partir de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) mediante el uso de Tecnologías Waste-to-Energy (WtE): Panorama Global y Perspectivas en Panamá

Resumen El uso de tecnologías Waste-to-Energy (WtE) para transformar Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en energía eléctrica es una solución sostenible en Panamá. Este enfoque reduce el volumen de desechos, disminuye emisiones de gases de efecto invernadero y sustituye combustibles fósiles, cubriendo las necesidades energéticas de más de 150,000 familias y promoviendo una economía circular.

Palabras clave. Recuperación energética de residuos; Gestión de residuos sólidos urbanos; Economía circular; Gases de efecto invernadero; Tecnologías Waste-to-Energy. JEL: Q42; Q53; O13; Q54; L95.

Generation of Electricity from Municipal Solid Waste (MSW) through the Use of Waste-to-Energy (WtE) Technologies: Global Overview and Prospects in Panama

Abstract The use of Waste-to-Energy (WtE) technologies to transform Municipal Solid Waste (MSW) into electricity is a sustainable solution in Panama. This approach reduces waste volume, decreases greenhouse gas emissions, and substitutes fossil fuels, meeting the energy needs of over 150,000 families and promoting a circular economy.

Keywords. Energy recovery from waste; Urban solid waste management; Circular economy; Greenhouse gases; Waste-to-Energy technologies. JEL Codes: Q42; Q53; O13; Q54; L95.

Geração de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) através do Uso de Tecnologias Waste-to-Energy (WtE): Panorama Global e Perspectivas no Panamá

Resumo O uso de tecnologias Waste-to-Energy (WtE) para transformar Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em energia elétrica é uma solução sustentável no Panamá. Esta abordagem reduz o volume de resíduos, diminui as emissões de gases de efeito estufa e substitui combustíveis fósseis, atendendo às necessidades energéticas de mais de 150.000 famílias e promovendo uma economia circular.

Palavras-chave. Recuperação energética de resíduos; Gestão de resíduos sólidos urbanos; Economia circular; Gases de efeito estufa; Tecnologias Waste-to-Energy. JEL: Q42; Q53; O13; Q54; L95.

INTRODUCCIÓN

La gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es un problema ambiental global que impacta a todos los países, principalmente a aquellos en vías de desarrollo y de bajos ingresos, para los cuales representa un porcentaje significativo del presupuesto. En el mundo, se generan anualmente 2,01 billones de toneladas de desechos sólidos municipales, y más del 30% de estos desechos representan un riesgo para la salud y el medio ambiente. Se estima que la cantidad de residuos sólidos urbanos a nivel mundial aumente 70% en los próximos 30 años y llegue a un volumen asombroso de 3,400 billones de toneladas de desechos generados anualmente. A nivel global solamente el 13.5% de los residuos se recicla y un 5% se composta, *World Bank Group* (2018).

De acuerdo con el informe de la Agencia para la Protección Ambiental (EPA-Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos, titulado *Mejores prácticas para la gestión de residuos sólidos* (EPA, 2020), en los países en vías de desarrollo la generación de residuos sólidos se triplicará para el año 2050.

En la región de América Latina y el Caribe, se generan unos 231 millones de toneladas de residuos, pero solo se recicla el 4,5% (Banco Mundial, 2019).

Panamá no escapa a esa realidad. Los problemas ambientales derivados del manejo y disposición de los residuos sólidos, vinculados a la fuerte concentración de la población en el territorio canalero (Castro, 2007), siguen ejerciendo una presión considerable sobre el ya colapsado sistema de vertederos a nivel nacional, identificados como vertederos a cielo abierto, lo cual agrava aún más la situación (Espinoza H., 2021).

De continuar el esquema actual sin ningún tipo de intervención, el volumen de residuos sólidos generados en el país se incrementaría en un 20% para el año 2026, pasando de 5,000 toneladas métricas (TM) diarias a 6,300 (INECO, 2017). En términos de generación anual, el volumen de residuos a nivel nacional equivale a 1,830,000 toneladas métricas (TM), de las cuales más del 50% se genera en las provincias de Panamá y Panamá Oeste.

La generación de residuos creció un 40% entre 2004 y 2009 (Alcaldía de Panamá, 2016) y un 13% durante el periodo 2014-2016, lo que equivale a unas 627 toneladas adicionales (Autoridad de Aseo Urbano y Domiciliario [AAUD], 2017).

En este contexto, los estudios previos muestran que las tecnologías de transformación de residuos sólidos a energía por combustión masiva, conocidas como Waste-to-Energy (WtE), representan una alternativa viable para reducir el volumen de residuos sólidos en los vertederos, sustituir el uso de combustibles fósiles en la matriz energética, contribuir a un sistema energético más eficiente y reducir la contaminación causada por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de los vertederos a cielo abierto.

La conversión termoquímica de los RSU para la generación de energía eléctrica, comparativamente, genera menos libras de CO₂ por megavatio hora que una planta de energía convencional alimentada por combustibles fósiles. Asimismo, produce menos emisiones que la eliminación de residuos mediante quema incontrolada a cielo abierto y considerablemente menos contaminantes que las emisiones de vehículos diésel y de gasolina.

Tabla 1

Tabla comparativa de emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) por Megavatio/Hora

COMBUSTIBLE	(CO ₂) (Libras por Megavatio hora)
Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	1016
Carbón	2249
Petróleo	1672
Gas Natural	1135

Fuente: Elaborado a partir EPA Emisiones al aire de las instalaciones de RSU (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2016).

De acuerdo con ICLEI (2021), por cada tonelada de residuos desviados de un vertedero para su transformación en energía, se puede evitar en promedio la emisión de una tonelada de gases de efecto invernadero.

El uso de los RSU como combustibles sustitutivos presenta importantes ventajas que deben ser consideradas:

- Evita las emisiones de metano provenientes de los vertederos a cielo abierto.
- Permite la generación de electricidad sustituyendo combustibles fósiles en la matriz energética.
- Ahorra emisiones y costos al evitar el transporte de larga distancia hacia los vertederos.
- Ofrece usos alternativos y convenientes para los espacios ocupados por los vertederos.

Los proyectos de energía a partir de residuos (WtE, Waste-to-Energy) pueden mejorar la salud pública y la seguridad al eliminar los desperdicios de los vertederos a cielo abierto. Sin embargo, es necesario contar con marcos normativos ambientales que permitan implementar tecnologías de control de emisiones para garantizar la calidad del aire y el éxito de los proyectos en el logro de sus objetivos ambientales y de salud (EPA, 2020).

De acuerdo con Galván (2023), las tecnologías de valorización energética de residuos (WtE, por sus siglas en inglés) pueden representar una opción para la transición hacia sistemas energéticos bajos en carbono. La utilización de los RSU como combustible alternativo podría ayudar a reducir las emisiones de GEI en los países emergentes.

Para la Agencia de Cooperación Internacional Alemana, en su informe “Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos” (2017), las tecnologías WtE representan soluciones atractivas para resolver problemas urgentes en la disposición de residuos y otros retos simultáneos, como la escasez en la generación de energía eléctrica, la eliminación de rellenos sanitarios y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la disposición inapropiada de residuos.

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, 2023), los proyectos de residuos a energía (WtE, Waste-to-Energy), o “energía a partir de residuos”, pueden mejorar la salud pública y la seguridad al eliminar los desperdicios de los vertederos abiertos. Además, permiten reducir las emisiones de carbono al sustituir el uso de energía proveniente de fuentes fósiles, al tiempo que disminuyen la generación de gas metano en los vertederos.

Desde el enfoque de la Economía Circular, la recuperación de energía es una opción viable para integrar la prevención, reutilización y reciclaje en la gestión de residuos cuando estas estrategias no son viables. En este sentido, la gestión eficiente de la energía procedente de los residuos puede facilitar la transición hacia una economía circular (EC) y el cumplimiento de las metas trazadas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, donde los residuos son considerados como un recurso y no como un problema de eliminación (Gato, 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio combina la investigación descriptiva, destinada a caracterizar y comprender la situación actual de los Residuos Sólidos

Urbanos (RSU) a nivel mundial, con la investigación exploratoria, enfocada en analizar el potencial de las tecnologías emergentes. Se utilizaron tanto fuentes cualitativas como datos cuantitativos para respaldar los hallazgos y las conclusiones. Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de diversas investigaciones relacionadas con las tecnologías de transformación de residuos sólidos a energía por combustión masiva, conocidas como Waste-to-Energy (WtE, por sus siglas en inglés), con el propósito de identificar oportunidades para su aprovechamiento y evaluar su aplicabilidad como alternativa para el tratamiento y eliminación de los RSU.

La metodología para la selección de los estudios publicados incluyó los siguientes criterios:

1. *Cronológicos*: Se consideraron estudios publicados en los últimos 15 años.
2. *Temas de interés*: Recuperación energética de residuos sólidos, Residuos a Energía, Transición energética y Tecnología para la gestión de residuos sólidos.
3. *Retos y oportunidades*: Se seleccionaron los artículos más representativos agrupándolos según los temas de interés.

La búsqueda de publicaciones científicas se realizó en la base de datos *ScienceDirect* utilizando palabras clave como “Residuos a Energía” (436 artículos) y “Waste To Energy” (897 artículos). Asimismo, en la base de datos *Scopus* se utilizó la palabra clave “Economía circular y valorización energética” (36 artículos).

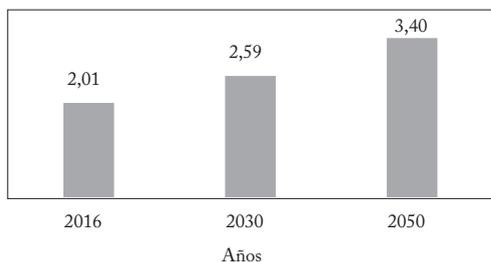
Se llevó a cabo un análisis de informes nacionales emitidos por diversas instituciones y autoridades locales relacionadas con el manejo y disposición de residuos sólidos y energía en Panamá, como la Autoridad de Aseo Urbano y Domiciliario (AAUD, 2017) y la Alcaldía de Panamá. Para evaluar la situación de la producción de energía eléctrica en el país, se consultó la página web de la Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). También se realizaron búsquedas en los sitios web oficiales de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), *Local Governments for Sustainability* (ICLEI, 2021) y la Agencia Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ).

Se revisaron estudios y estadísticas globales sobre la generación de residuos emitidos por el *World Bank Group* (2018), que señala que en el mundo se generan anualmente 2,01 billones de toneladas de desechos sólidos municipales, de los cuales más del 30% representan un riesgo para la salud y el medio ambiente.

Según el informe del Banco Mundial (2018, págs. 2-3), se proyecta que la rápida urbanización, el crecimiento de la población y el desarrollo económico provocarán un aumento del 70% en la cantidad de desechos generados a nivel mundial en los próximos 30 años, alcanzando un volumen asombroso de 3,400 billones de toneladas de residuos anuales para el año 2050 (Banco Mundial, 2018; Banco Mundial, 2019).

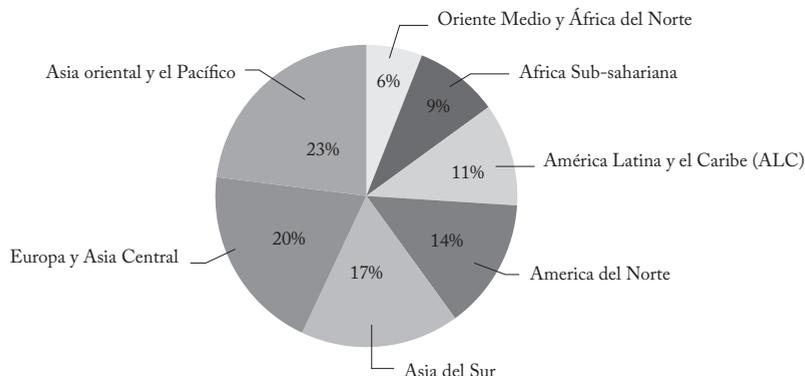
El siguiente gráfico presenta un panorama global resumido y las tendencias de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU):

Gráfico 1
Generación de residuos sólidos -Proyección Mundial año:2018



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial (BM) 2018.

Gráfico 2
Generación de residuos por región a nivel mundial (%), (En billones de toneladas) (Participación relativa año: 2018)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial (BM) 2018.

A nivel nacional: La investigación incluyó una visita y recorrido por las instalaciones del principal vertedero del país, ubicado en Cerro Patacón, ciudad de Panamá. Este ejercicio permitió observar y validar,

junto con los proveedores de servicios de gestión de residuos, las facilidades y el estado actual del vertedero.

DEMOGRAFÍA - DENSIDAD POBLACIONAL

Para conocer y validar la concentración de la población en las áreas urbanas, el estudio utilizó como fuente primaria los datos oficiales del Censo de Población realizado en Panamá en el año 2023 (Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) - Panamá):

El siguiente cuadro presenta la distribución y concentración de la población en el país, por provincia y comarca:

Cuadro 2.

Población en la República de Panamá por provincia Censos Nacionales año: 2023

Año	Total	Bocas del Toro	Coclé	Chiriquí	Darién	Herrera	Los santos	Panamá	Panamá Oeste	Colón	Veraguas	Comarca Kuna Yala	Comarca Emberá	Comarca Ngäbe Buglé
		Población por provincia												
2023	4.064.780	159.228	268.264	471.071	54.235	122.071	98.466	1.439.575	653.665	281.956	259.791	32.016	12.358	212.084
Participación %	100,0	4	6,6	11,6	1,3	3,0	2,4	35,4	16,1	6,9	6,4	0,8	0,3	5,2

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censo (INEC).

De acuerdo con los datos presentados por el INEC, para el año 2023, más del 50% de la población panameña se concentra en la provincia de Panamá y territorios cercanos.

CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Para evaluar y cuantificar las posibilidades de aprovechamiento de los RSU, el estudio consideró los siguientes datos:

- El volumen de residuos generados para las diferentes tipologías.
- La composición de los residuos generados.
- Las características fisicoquímicas de los residuos en Panamá (publicado por la Autoridad Nacional de Aseo Urbano y Domiciliario [AAUD], 2017).

A continuación, se presenta de manera resumida la caracterización de los residuos sólidos urbanos en Panamá para el año 2017, y una vista panorámica del principal vertedero del país año 2023:

Cuadro 1.
Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Caracterización	%
Residuos Orgánicos	45%
Plástico	22%
Papel y cartón	13%
Vidrios	5%
Metales	5%
Otros	10%

Fuente: Elaboración propia con base a datos del plan municipal de gestión integral de residuos en ciudad de Panamá (AAUD) 2017.

Fotografía 1
Vertedero Cerro Patacón



Fuente: Visita al vertedero Cerro Patacón, corregimiento de Ancón, Ciudad de Panamá. Año 2023.

De acuerdo con “El Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos 2017-2027” de Panamá. La mayor fracción de los *RSU* corresponde a la materia orgánica (45.7%), seguida por el plástico (22%) y el papel (13%). En la valoración energética de los *RSU* no se considera el porcentaje de vidrios y metales pues éstos son inertes y no influyen en la estimación del Poder Calorífico (Poletto & Da Silva, 2009). En el caso de la fracción denominada “otros”, no se considera por la ausencia de información sobre su composición específica, lo que imposibilita determinar sus propiedades.

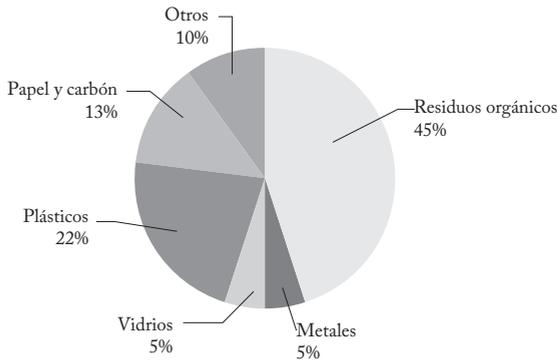
Los residuos que se considerados apropiados para el proceso de aprovechamiento energético fueron: Materia Orgánica, Plástico, Papel y Cartón, las cuales en su conjunto representan el 80% del total de los *RSU* generados a nivel nacional.

Los nuevos valores que representan cada componente en el conjunto de *RSU* para generar energía fueron recalculadas y se presentan en la Tabla 1 (columna: % adecuados RAE).

A continuación, se presenta la composición de Residuos Sólidos Urbanos (*RSU*) generados a nivel país, y la participación relativa de residuos adecuados para la tecnología Residuo-a-Energía (*Waste to Energy*).

Gráfico 3.

Composición de los RSU generados a Nivel Nacional (Participación Relativa)



Fuente: Elaboración propia con base a datos del plan municipal de gestión integral de residuos en ciudad de Panamá (AAUD) 2017, con base el modelo planteado por Montiel-Bohórquez & Pérez, 2019. (Montiel-Bohórquez & Pérez, 2019).

Cuadro 2.

Residuos adecuados para el uso de Tecnologías Waste-to-Energy (WtE)/ Residuo-a-Energía (RAE)

Componente	(%) total RSU	% Adecuado RSU
Residuos orgánicos	45	56
Plásticos	22	28
Papel y cartón	13	16
Vidrios	5	—
Metales	5	—
Otros	10	—
Total	100	100

Fuente: Elaboración propia con base a datos del plan municipal de gestión integral de residuos en ciudad de Panamá (AAUD) 2017, con base el modelo planteado por Montiel-Bohórquez & Pérez, 2019. (Montiel-Bohórquez & Pérez, 2019).

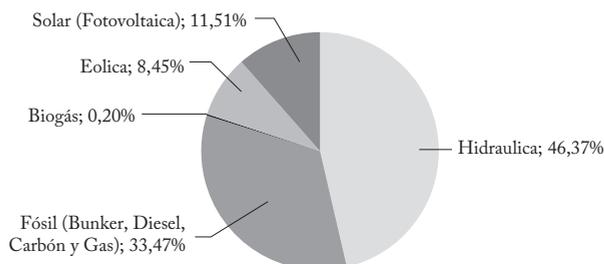
MATRIZ ENERGÉTICA

Se realizó un análisis de la matriz energética del país y la capacidad instalada por tipo de tecnología, basado en los datos oficiales emitidos por la Autoridad Nacional de Servicios Públicos de Panamá para los

años, (2023) y (2024) y la Agenda de Transición Energética (2020-2030), elaborada en el año 2020, por Secretaría de Energía.

El siguiente gráfico presenta la matriz energética de Panamá por tipo de tecnología y participación relativa en la generación de electricidad.

Gráfico 3.
Matriz energética de Panamá año 2023-2024



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la ASEP 2023-2024

Cuadro 2.
Capacidad Instalada por tipo de tecnología

Tecnología	MW	Participación relativa (%)
Hidro de Embalse	620.00	15.59%
Hidro de Pasada	1224.70	30.79%
Biogás	8.10	0.20%
Gas	381.00	9.58%
Carbón	300.00	7.54%
Bunker	454.12	11.42%
Diésel	196.43	4.94%
Eólica	336.00	8.45%
Fotovoltaica	457.82	11.51%
Total	3,978.17	100.0%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la ASEP 2023-2024

De acuerdo con el informe denominado “Estadística del Mercado Eléctrico Panameño”, el 33.47% de la energía que utiliza el país proviene de fuentes no renovables. La demanda mensual promedio de energía se estima en unos 2,030 MW, (Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP), 2023), en dicho informe se establece como perspectiva para Panamá, que el 30% de matriz energética del país deberá provenir de energías renovables como eólica, solar y biomasa²,

² La biomasa es toda materia de origen orgánico (vegetal o animal), en tanto que la bioenergía es la energía obtenida por medio de la transformación y uso de la biomasa. La biomasa puede ser utilizada como combustible para generar calor y electricidad. La biomasa sólida puede ser clasificada en: Residuos forestales y de la industria forestal; Residuos agrícolas y agro-

en ese sentido, ayudar a la reducción de la generación eléctrica con fuentes de combustibles fósiles, contribuyendo con el cumplimiento de los Objetivos del Desarrollo Sostenible, objetivo ODS 7, y el acuerdo de París en materia de lucha contra el cambio climático.

TECNOLOGÍA DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO (WASTE-TO- ENERGY)

Las tecnologías de transformación de residuos sólidos a energía por combustión masiva WtE (por sus siglas en inglés *Waste To Energy*), también conocida como energía a partir de residuos, es un proceso de tecnología utilizado en el ámbito de las energías renovables, en el que los residuos que no se reciclan ni son utilizados, son transformados en energía en forma de calor, vapor o electricidad.

La electricidad generada se inyecta a la red y se distribuye a los hogares, industrias y comunidades, en ese sentido, las tecnologías (WtE) o Residuos a Energía (RAE), proporcionan una alternativa rentable e higiénica a tratar los residuos sólidos, reduciendo su volumen en un 90%, y un 10% de cenizas como subproducto que pueden ser reutilizado en otros procesos y con ellos recuperar el 100%. (Local Governments for Sustainability (ICLEI), 2021).

De acuerdo con la Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2024), Una planta típica de conversión de residuos en energía genera alrededor de 550 kilovatios hora (kWh) de energía por tonelada de residuos, a un precio promedio de cuatro centavos por kWh, los ingresos por tonelada de residuos sólidos suelen ser de 20 a 30 dólares.

Los desechos utilizados para alimentar las plantas de energía por quema masiva pueden o no clasificarse antes de ingresar a la cámara de combustión, aunque muchos municipios, hoy día ya separan los residuos para recuperar aquellos productos que pueden ser reciclables. (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2024)

Según ICLEI (2021), una planta grande y moderna que trata medio millón de toneladas de residuos sólidos urbanos al año puede generar más de 400 millones de kWh de energía al año, cubriendo las necesidades eléctricas de más de 150.000 familias.

industriales; Residuos pecuarios, pesqueros y acuícolas; Cultivos energéticos y “Residuos sólidos urbanos o municipales (RSU)”. (Comisión Económica para América Latina (CEPAL), 2021).

POTENCIAL DE ENERGÍA

En Panamá, para el año 2017, según el informe presentado Autoridad de Aseo Urbano y Domiciliario, en conjunto con INECO (2017), la generación de residuos sólidos, per cápita en Panamá es de 1.241 (kg./hab./día), es decir, unas 5000 toneladas diarias y un estimado de 1,830,000 toneladas al año a nivel nacional, la fracción de los RSU que se considera aprovechable energéticamente corresponde al 80% del total de RSU generados, (Cuadro No2 Caracterización de los RSU), es decir, una 1,464 TM aprovechables para (WtE).

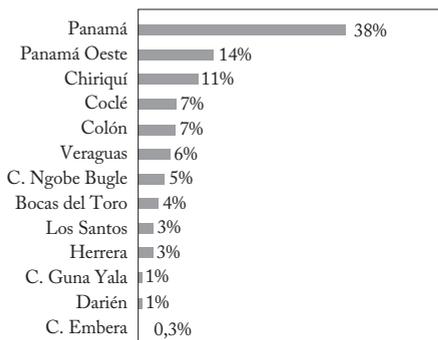
La siguiente tabla presenta la participación relativa por provincia en la generación de residuos:

Tabla 2.
Generación de RSU en Panamá por provincia en TM

Provincia	Participación relativa	Toneladas métricasTM
Panamá	38%	695,400
Panamá Oeste	14%	256,200
Chiriquí	11%	201,300
Coclé	7%	128,100
Colón	7%	128,100
Veraguas	6%	109,800
C. Ngobe Bugle	5%	91,500
Bocas Del Toro	4%	73,200
Los Santos	3%	54,900
Herrera	3%	54,900
C. Guna Yala	1%	18,300
Darién	1%	18,300
C. Embera	0%	55
Total	100%	1,830,054.90

Fuente: Elaboración propia con base a datos del plan municipal de gestión integral de residuos en ciudad de panamá (AAUD) 2017.

Gráfico 4.
Participación relativa por provincia en la generación de RSU



Fuente: Elaboración propia con base a datos del plan municipal de gestión integral de residuos en ciudad de panamá (AAUD) 2017.

Hoy día, la eficiencia global de las plantas modernas de generación eléctrica por combustión oscila entre 550 kilovatios a 800 kWh, por tonelada de residuos. (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2024); ICLEI (Local Governments for Sustainability (ICLEI), 2021), al realizar la conversión con los datos presentados por la Autoridad de Aseo Urbano y Domiciliario (2017), (Tabla No2), tan solo la provincia de Panamá genera el 38% de los *RSU* en el país, unas 695,400 TM; con un 80% de potencial energético aprovechable, es decir, 556,320 TM al año, con capacidad para cubrir las necesidades de unas 152,988 familias con consumo promedio de 2000 kWh.

La tabla No3 presenta de manera resumida la conversión de los residuos sólidos urbanos de la ciudad capital y el potencial energético estimado con base al nivel de eficiencia de plantas de generación de electricidad combustión según los parámetros de establecido por (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2024).

Tabla 3.
Evaluación del potencial de los residuos generados en la Provincia de Panamá

Toneladas Métricas de Residuos Sólidos Urbanos al año (Ciudad Capital)	(% RSU) aprovechables (80%) TM al año	Generación (EPA 2024) (kWh)(TM) (550kwh)	Consumo promedio Kwh por familia (2000kwh)	MW
695,400	556,320.00	305,976,000	152,988.00	305,976

Fuente: Elaboración propia, utilizando como referencia datos del Censo de Panamá; ASEP; (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2024); ICLEI (Local Governments for Sustainability (ICLEI), 2021), AAUD (2017).

Es importante resaltar que las estimaciones y el potencial real de generación de energía eléctrica a partir de RSU puede variar según la caracterización de los residuos y de la tecnología utilizada.

La recuperación de energía a partir de los RSU por combustión (WtE) es la tecnología puntera y el método más usado hoy día, la conversión termoquímica permite atender los problemas vinculados con la eliminación de los RSU, si bien es cierto, que la incineración de residuos sólidos, se consideraba en el pasado simplemente como un método reducir la masa y el volumen de los residuos dejando un residuo estéril adecuado para vertedero; a partir de los años 80's y con mayor intensidad en los años 90' nuevas tecnología fueron desarrolladas para aprovechar el potencial energético de los residuos, impulsadas principalmente por un aumento mundial de los precios

de los combustibles fósiles, las preocupaciones por el Cambio Climático, las emisiones de (CO₂), Incentivos financieros y el nuevo enfoque de la Economía Circular que considera los residuos como un recurso y no un problema. (Castaldi, Deventer, Lavoie, Legrand, & Nzihou, 2017)

RESULTADOS

Los estudios previos evidencian que las tecnologías de transformación de Residuos Sólidos Urbanos (*RSU*) a energía por combustión masiva, “*Waste To Energy (WtE)*”, con o sin separación de los residuos en origen, representan una alternativa, cuando la reutilización y el reciclaje no son estrategias viables para los países. Comparativamente hablando, la energía eléctrica a partir de *RSU*, genera menos libras de dióxido de Carbono (CO₂), por megavatio hora que las plantas de generación de energía convencionales alimentadas por combustibles fósiles, (Gas, Petróleo o Carbón), EPA (2016), su utilización como energía sustitutiva se convierte en una solución inmediata a la contaminación proveniente de los vertederos y quemas a cielo abierto, mejorando el medioambiente, la salud pública, un mejor uso de los recursos y una mayor eficiencia energética del país. Por cada tonelada de residuos que logremos desviar de un vertedero para transformación a energía, un promedio de una tonelada de gases de invernadero se puede evitar ICLEI (2021), contribuyendo de esta manera con la transición hacia sistemas energéticos bajos en carbono, Galván (2023), y el cumplimiento de las metas trazadas con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). Se convierten, en ese sentido, en una alternativa rentable e higiénica que permite atender los problemas vinculados al manejo y disposición de los residuos sólidos, reduciendo su volumen hasta en un 90%, y un 10% de cenizas como subproducto que puede ser reutilizado en otros procesos y con ellos recuperar el 100%. (Local Governments for Sustainability (ICLEI), 2021) .

En Panamá se generan a nivel nacional alrededor de 1,830,000 toneladas métricas de *RSU*; el 80% de los residuos (1,464,000 TM) se consideran aprovechables energéticamente mediante tecnologías *Waste-to-Energy (WtE)*.

Tomando como referencia la provincia de Panamá con 556,320 TM de *RSU* aprovechables al año y una eficiencia de 550 kWh por tonelada, es posible producir 305,976,000 (kWh), de energía eléctrica, esta producción de energía sería suficiente para cubrir las necesidades de aproximadamente 152,988 familias con un consumo promedio de

2000 (kWh), generando impactos positivos a la economía, el ambiente y la salud de la población:

- Menor costo de oportunidad por kWh versus utilización de combustibles fósiles tradicionales.
- Reducción del volumen de residuos en vertederos a cielo abierto en un 90%, permitiendo la recuperación y mejor uso de los espacios degradados.
- Sustitución de combustibles fósiles en la matriz energética.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de vertederos y combustibles fósiles.
- Reducción de impactos a la salud de la población por la emisión de gases tóxicos provenientes de los vertederos.

DISCUSIÓN

El manejo, disposición y eliminación de los Residuos Sólidos Urbanos (*RSU*), es un problema de alcance global latente. Los estudios previos muestran que la generación de (*RSU*), seguirá en aumento en los próximos años, duplicándose a nivel global para el año 2030. En América Latina se estima que la producción de residuos se triplicará para el año 2050.

Los resultados muestran que, en estos momentos, en Panamá existe una gran oportunidad para la generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de los (*RSU*) mediante las tecnologías WtE.

De acuerdo con (Galván, 2023), Panamá es uno de los países a nivel la región Latinoamericana con contextos y perspectivas favorables para la implementación exitosa de tecnologías WtE térmicas.

Es una alternativa que puede contribuir a resolver problemas urgentes como el manejo, disposición y eliminación adecuada de residuos urbanos, la escasez de energía eléctrica y la reducción de emisiones de GEI.

La utilización de estas tecnologías se alinea con los enfoques de Economía Circular, donde los residuos son vistos como un recurso y no un problema. Además, apoya el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los acuerdos de lucha contra el Cambio Climático.

Para una implementación exitosa será necesario contar con marcos normativas modernos que permitan garantizar el éxito de los proyectos WtE en el logro de los objetivos ambientales y de salud de la población.

CONCLUSIONES

El aprovechamiento energético de residuos sólidos no es una solución independiente: forma parte de un conjunto de soluciones del sistema de tratamiento de residuos, el cual debe estar enmarcado en un plan integral que puede ayudar a las administraciones con el logro de los objetivos en materia de manejo, disposición y eliminación de los residuos sólidos urbanos (*RSU*).

Los (*RSU*) representan un recurso valioso para la generación de energía eléctrica en Panamá, mediante el uso de tecnologías Waste-to-Energy (WtE), la implementación de estas tecnologías puede ayudar a reducir el volumen de residuos en vertederos a cielo abierto, sustituir el uso de combustibles fósiles en la matriz energética y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

El potencial energético de los residuos generados solo en la provincia de Panamá podría cubrir las necesidades eléctricas de más de 150,000 familias, demostrando la viabilidad y los beneficios de esta alternativa; Sin embargo, es fundamental contar con un marco normativo adecuado que permita el cumplimiento exitoso de proyectos WtE, cumpliendo con los objetivos económicos, ambientales, de salud pública y de Desarrollo Sostenible.

REFERENCIAS

- Agencia Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ). (2017). *Guía para los responsables de la toma de decisiones en países en vías de desarrollo y emergentes*. Bonn y Eschborn, Alemania: Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Obtenido de <https://www.bivica.org/file/view/id/5099>
- Alcaldía de Panamá. (2016). *Plan municipal de gestión integral de residuos en ciudad de Panamá*. Centre Tecnològic BÈTA, Barcelona. Obtenido de <https://basuracero.mupa.gob.pa/wp-content/uploads/2019/07/Plan-Municipal-Conceptual-de-Manejo-Integral-de-Residuos-Panam%C3%A1-Convenio-VIC-Barcelona.pdf>
- Autoridad de Aseo Urbano y Domiciliario [AAUD]. (2017, julio 17). *Plan nacional de gestión integral de residuos 2017-2027*. Obtenido de <https://www.aud.gob.pa/plangestion/PNGIR.pdf>
- Autoridad de Aseo Urbano y Domiciliario de Panamá [AAUD]. (2014-2015). *Autoridad de aseo diagnóstico por provincia*. Obtenido de <https://www.aud.gob.pa/index.asp?sec=Proyectos/Diagnostico&id=diagnostico>
- Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2023). *Estadística del mercado eléctrico panameño*. Panamá: ASEP. Obtenido de https://www.asep.gob.pa/wp-content/uploads/electricidad/estadisticas_mensuales/2023/JUNIO_2023.pdf

- Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP). (2024). *Capacidad instalada por tipo de tecnología (MW) - (2010-2024)*. Panamá: ASEP. Obtenido de <https://infogram.com/comportamiento-del-mercado-mayo-2023-1h8n6m3yvod3j4x>
- Banco Mundial. (2018, septiembre 20). *Los desechos: un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>
- Banco Mundial. (2019, marzo 6). *Convivir con basura: el futuro que no queremos*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2019/03/06/convivir-con-basura-el-futuro-que-no-queremos>
- Castaldi, M., Deventer, J. v., Lavoie, J., Legrand, J., & Nzihou, A. (2017). *Progress and Prospects in the Field of Biomass and Waste to Energy and Added-Value Materials*. *Hal Open Science*, 1875-1884. Obtenido de <https://hal.science/hal-01617869/file/progress-and-prospects.pdf>
- Castro, G. H. (2007). *El agua entre los mares*. Panamá: Ciudad del Saber.
- Comisión Económica para América Latina (CEPAL). (2021). *Evaluación del potencial energético de los recursos biomásicos*. Santiago: Naciones Unidas. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47650-evaluacion-potencial-energetico-recursos-biomasicos-honduras>
- EPA. (2020, octubre). *Mejores prácticas para la gestión de los residuos sólidos: Una guía para los responsables de la toma de decisiones en los países en vías de desarrollo*. Obtenido de <https://nepis.epa.gov/Exec/zyPDF.cgi/P10116D1.PDF?Dockey=P10116D1.PDF>
- Espinoza H., A. D. (2021). La economía circular, una alternativa de gestión ambiental para el manejo y disposición de residuos sólidos en Panamá. *Plus Economía*, 54-70.
- Galván, S. L. (2023). Transición energética en América Latina y el Caribe. Desafíos y oportunidades para las tecnologías de valorización energética de residuos sólidos. *Revista de Estudios Ambientales*, 4-23. Obtenido de <https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudios-ambientales/article/view/1707>
- Gato, A. (2023, agosto). Quantifying management efficiency of energy recovery from waste for the circular economy transition in Europe. *ScienceDirect*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262301106X>
- INECO. (2017). *Plan nacional de gestión integral de residuos 2017-2027*. AAUD, Autoridad de Aseo Urbano y Domiciliario, Panamá. Obtenido de <https://www.aud.gob.pa/plangestion/PNGIR.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) - Panamá. (2023). *Resultados finales básicos: XII Censo Nacional de Población y XIII de Vivienda*. Panamá: INEC. Obtenido de https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=1199&ID_CATEGORIA=19&ID_SUBCATEGORIA=71
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2013). *Cuadro 14: Resumen de la estimación y proyección de la población total de la República, por provincia, comarca indígena y distrito, según sexo: Años 2010-2020*. Obtenido de <https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3>

- aspx?ID_PUBLICACION=499&ID_CATEGORIA=3&ID_SUB-CATEGORIA=10
- Local Governments for Sustainability (ICLEI). (2021). *Waste-to-Energy*. Alemania: Local Governments for Sustainability. Obtenido de <https://renewablesroadmap.iclei.org/resourcescategories/fact-sheets/>
- Montiel-Bohórquez, N. D., & Pérez, J. F. (2019). Generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos. Estrategias termodinámicas para optimizar el desempeño de centrales térmicas. *Scielo*, 273–284. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642019000100273
- Poleto, J. A., & Da Silva, C. L. (2009). Influencia de la separación de residuos sólidos urbanos para reciclaje en el proceso de incineración con generación de energía. *Scielo*, 105–112. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642009000200013
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2020). *Análisis socioeconómico del impacto del COVID-19 en Panamá: Escenarios económicos prospectivos y alcance de las opciones de política en Panamá*. PNUD. Obtenido de https://www.pa.undp.org/content/panama/es/home/library/crisis_prevention_and_recovery/analisis-socioeconomico-del-impacto-del-covid-19-en-panama-estud.html
- Secretaría de Energía. (2020-2030). *Lineamientos estratégicos: Agenda de transición energética 2020-2030*. Panamá: Secretaría de Energía. Obtenido de <https://www.energia.gob.pa/mdocs-posts/lineamientos-de-la-agenda-de-transicion-energetica/>
- Secretaría Nacional de Energía. (2016). *Plan energético nacional 2025-2050*. Panamá: SNE. Obtenido de <https://www.senacyt.gob.pa/wp-content/uploads/2018/12/3.-Plan-Energetico-Nacional-2015-2050-1.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2016). *Wastes - Non-Hazardous Waste - Municipal Solid Waste*. Obtenido de <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/airem.html#7>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2024). *Energy recovery from the combustion of municipal solid waste (MSW)*. Estados Unidos: EPA. Obtenido de <https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw#:~:text=A%20typical%20waste%20to%20energy,often%2020%20to%2030%20dollars>
- United States Environmental Protection Agency. (2023, abril 21). *EPA*. Obtenido de <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>
- World Bank Group. (2018). *What a Waste 2.0*. Washington, DC: Banco Mundial. Obtenido de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2174>