

Transición energética en América Latina y el Caribe.

Desafíos y oportunidades para las tecnologías de valorización energética de residuos sólidos

Energy Transition in Latin America and the Caribbean.

Challenges and opportunities for waste-to-energy technologies

Silvia Luciana Galván¹,

Laura Valeria Sosa²,

Norma Gabriela Faitani²,

Raquel Ofelia Bielsa¹

¹Instituto del Conurbano, Universidad Nacional de General Sarmiento. J.M. Gutiérrez 1150,
1613 Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Instituto del
Conurbano, Universidad Nacional de General Sarmiento.

E mail: rbielsa@campus.ungs.edu.ar

Galván, S, L., Sosa, L, V., Faitani, N, G., Bielsa, R, O., (2023) Transición energética en América Latina y el Caribe. Desafíos y oportunidades para las tecnologías de valorización energética de residuos sólidos. *Revista Estudios Ambientales*, 11 (1), 4-23.

Recibido: 16/12/2022 - **Aceptado:** 24/04/2023 - **Publicado:** 18/07/2023

RESUMEN

La producción de energía genera la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) porque la matriz energética mundial se basa, predominantemente, en combustibles fósiles. En este contexto, las tecnologías de valorización energética de residuos (WtE por sus siglas en inglés) pueden representar una opción para una transición hacia sistemas energéticos bajos en carbono, ya que la utilización de los RSU (residuos sólidos urbanos) como combustible alternativo, podría ayudar a reducir las emisiones de GEI. En los países emergentes, las WtE se aplican en plantas piloto o pequeñas instalaciones y el principal destino de los RSU son los rellenos sanitarios. En las megaciudades latinoamericanas, las preocupaciones ambientales relacionadas con los rellenos sanitarios han llevado a nuevas regulaciones que incluyen al uso de

residuos como fuentes de energía alternativa. Este artículo tiene como objetivo analizar las barreras y oportunidades para la implementación de las tecnologías WtE en América Latina y el Caribe (ALC), a través de indicadores basados en aspectos técnicos, económicos y ambientales, sintetizados en tres índices y evaluados mediante un análisis FODA. Los resultados mostraron que las tecnologías WtE que utilizan desechos orgánicos tienen algunas oportunidades, mientras que las tecnologías termoquímicas deberían superar barreras económicas y técnicas, como la separación en origen y la recolección diferenciada de RSU.

PALABRAS CLAVE: América Latina y el Caribe; Valorización energética de residuos; Sistema eléctrico, gestión de residuos sólidos urbanos, Análisis FODA.

ABSTRACT

Energy production generates the largest share of greenhouse gas emissions because the world energy matrix is based predominantly on fossil fuels. In this context, waste-to-energy (WtE) technologies may represent an option for a transition to low-carbon energy systems as the use of MSW (municipal solid waste) as an alternative fuel could help reduce greenhouse gas emissions. In emerging countries, WtE are applied in pilot plants or small facilities and the main destination of MSW is landfills. In Latin American megacities, environmental concerns related to landfills have led to new regulations involving the use of waste as alternative energy sources. This article aims to analyze the barriers and opportunities for the implementation of WtE technologies in Latin America and the Caribbean through indicators based on technical, economic, and environmental aspects, synthesized in three indices, and evaluated through a SWOT analysis. Results show that WtE technologies using organic waste have some opportunities, while thermochemical technologies should overcome economic and technical barriers such as source separation and differentiated MSW collection.

KEYWORDS: *energy transition, Latin America and the Caribbean, waste to energy, electricity system, municipal solid waste management, SWOT analysis.*

INTRODUCCIÓN

América Latina y el Caribe (ALC) cuenta con 250 metrópolis, con casi un 80% de población urbana (CEPAL, 2021). Se espera que ésta crezca a una tasa anual de 1,06%, entre 2020 y 2035 (UN Hábitat, 2020). Las grandes ciudades, que fueron epicentro de la pandemia de COVID-19, aún deben recuperarse tanto de la pandemia como de la recesión económica que esta misma provocó.

En este contexto, la urbanización sustentable puede contribuir a los esfuerzos globales de reconstrucción luego de la crisis y a luchar contra la pobreza, inequidad, desempleo y cambio climático. Entre los grandes desafíos para los países emergentes se encuentran mejorar la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) y la cobertura de la demanda energética y reducir los impactos asociados.

En los países de la región el consumo de energía es muy sensible a los cambios económicos, por lo que el crecimiento económico se refleja en un crecimiento exponencial del consumo energético (Pablo-Romero y de Jesús, 2016). Algunas estimaciones indican que la demanda de energía aumentará en más del 25% en 2040 y que la de electricidad se duplicará (IEA, 2018). Según la Organización Latinoamericana de Energía, en 2018, alrededor de 18,1 millones de personas aún carecían de acceso a la electricidad (Castillo et al., 2019).

Según IRENA (2021), avanzar en la transición energética al ritmo necesario para mantener el calentamiento global por debajo de 1,5 °C requeriría la descarbonización casi completa del sector eléctrico para 2050, un objetivo difícil de alcanzar. En el caso de ALC, si bien su matriz energética tiene un fuerte componente renovable (debido a la

energía hidroeléctrica), muchos países aún dependen fuertemente del petróleo, el gas natural y sus derivados. Pero la transición energética no sólo requiere avanzar hacia modelos energéticos menos dependientes del carbono, sino también, a modelos más resilientes y asequibles. Es decir, se requiere un equilibrio entre los aspectos económicos, sociales y ambientales.

En relación con la gestión de residuos, ha surgido el concepto de economía circular, el que debería aplicarse también a la gestión urbana en general. Este concepto busca considerar a los RSU como recursos que permitan recuperar materiales y energía, reduciendo los impactos ambientales de la extracción de recursos abióticos y la disposición final de residuos. Algunas iniciativas que surgen como respuesta a esta problemática incluyen a las tecnologías de valorización energética de RSU, conocidas como tecnologías waste-to-energy (WtE), poco implementadas aún en ALC.

En este artículo, se busca identificar las principales barreras y oportunidades para la implementación de las tecnologías WtE como herramientas de transición energética en ALC. Para ello, se desarrolló una serie de indicadores basados en aspectos técnicos, económicos, institucionales y ambientales, sintetizados en tres índices que dan un panorama del sistema eléctrico, el sistema de gestión de residuos y el contexto económico e institucional de cada país, que pueden propiciar o no la incorporación de estas tecnologías. Las tecnologías WtE analizadas fueron: incineración de RSU con recuperación de energía, digestión anaeróbica de RSU, y aprovechamiento de gas de relleno sanitario. Finalmente, dichos índices fueron evaluados mediante un análisis FODA.

METODOLOGÍA

Se desarrollaron tres índices para describir el sistema eléctrico (ISE), el sistema de

gestión de RSU (IGR) y el contexto económico e institucional (IEI) de cada país de ALC. El valor de cada índice se calcula como el valor promedio de diferentes indicadores numéricos y categóricos, que consideran aspectos técnicos, económicos y ambientales para caracterizar al sistema eléctrico, la “madurez” de su sistema de gestión de RSU y el contexto económico e institucional que propician o no el desarrollo de las WtE. Los índices, indicadores y los criterios de valoración aplicados se describen en las Tablas 1 a 3. Para los indicadores categóricos, se asignó un valor de 1 en caso de que exista un atributo específico, un valor de 0 si no existe y un valor de 0,5 si la existencia es parcial. En el caso de los indicadores numéricos, se dividió el total alcanzado en cada uno en cuatro categorías (baja, medio-baja, intermedio-alta y alta) a partir del valor promedio y se les asignó un valor que varía entre 1 y -1, dependiendo de si el valor medido para el indicador favorece o no la implementación de tecnologías WtE. Un valor de -1 y -0,5 no favorece la implementación y un valor de 1 y 0,5 sí la favorece:

- Categoría Baja (-1): valores debajo del promedio dividido por dos.
- Medio-bajo (-0,5): valores entre el promedio dividido por dos y el promedio.
- Intermedio-alto (0,5): valores entre el promedio y el promedio más el promedio dividido dos.
- Alto: valores mayores que el promedio más el promedio dividido dos.

Finalmente, se realizó un análisis FODA (fortalezas, oportunidades, debilidades, amenazas), basado en los resultados obtenidos de los tres índices para identificar barreras y oportunidades a la aplicación de las tecnologías WtE como herramientas de transición energética en ALC. En un análisis FODA, se utilizan criterios internos para interpretar y resaltar las fortalezas y debilidades de cualquier organización o cualquier tipo de

planificación estratégica, mientras que los criterios externos se utilizan para explorar las oportunidades asociadas y las amenazas presentes en el contexto de estudio. Este análisis se utiliza generalmente como herramienta para evaluar y definir el camino que una empresa, agencia u organización debe seguir en el futuro (Jaber et al., 2015; Kamran et al., 2020).

La información para el cálculo de los indicadores e índices se obtuvo de publicaciones científicas, reportes y sitios web de los gobiernos y organizaciones de los países de ALC hasta 2020 (Castillo et al., 2019; Diez et al., 2019; Kaza et al., 2018; Martínez Arce et al., 2010; ONU Medio Ambiente, 2018; enlaces a sitios web listados al final del apartado referencias)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características del sistema eléctrico en ALC

Los resultados del índice ISE se presentan en la Figura 1. Diez de los 27 países bajo análisis obtuvieron valores negativos, mostrando en Guatemala y Honduras los menores valores. En el otro extremo, Trinidad y Tobago y Chile mostraron los ISE más altos.

Con respecto a los componentes del índice ISE y en relación con las características de la matriz eléctrica, existe una participación alta de fuentes no renovables, principalmente en países insulares, como Trinidad y Tobago, que tiene el 100% de su generación eléctrica a partir de fuentes fósiles. Paraguay, Uruguay y Costa Rica mostraron lo contrario. En 2019, el 100% de la electricidad generada en Paraguay fue hidroeléctrica renovable, Uruguay tuvo una generación térmica a partir de fuentes fósiles de menos del 2% y, en Costa Rica, la generación térmica renovable y no renovable no superó el 1%. Sin embargo, es importante mencionar que el 60% de los

países de ALC continental tienen sistemas eléctricos que dependen de fuentes no renovables en un 40% o más (Castillo et al., 2019). En los últimos 10 años ALC ha incorporado las energías renovables al sector eléctrico, siendo las de mayor penetración la eólica y la solar. La energía eólica aumentó su participación del 0,5 al 5,9% entre 2010 y 2018, mientras que la solar alcanzó una participación del 2,1% en 2018 (Messina, 2020).

Tabla 1: Descripción de indicadores y criterios de valoración que componen al índice

$$ISE = (SE_1 + SE_2 + SE_3 + SE_4) / 4.$$

Indicador - Tipo	Descripción	Criterio
SE ₁ : matriz eléctrica Numérico	Diferencia entre participación de fuentes no renovables y renovables en la generación térmica.	A menor diferencia, menor necesidad de incorporar tecnologías WtE.
SE ₂ : consumo eléctrico per cápita Numérico	kWh per cápita (anual)	A mayor consumo, mayor necesidad de incorporar tecnologías WtE
SE ₃ : peso del precio de energía en el PBI per cápita Numérico	Relación entre precio de la energía y PBI per cápita (anual)	A mayor peso, menor capacidad de pago de la población, y por lo tanto menor posibilidad de incorporar tecnologías WtE
SE ₄ : acceso a la electricidad Numérico	Población con acceso al servicio de electricidad (%)	A mayor acceso al servicio eléctrico, mayor oportunidad para incorporar tecnologías WtE

Tabla 2: Descripción de indicadores y criterios de valoración que componen el índice

$$IGR = (GR_1 + GR_2 + GR_3) / 3.$$

Indicador - Tipo	Descripción	Criterio
GR ₁ : generación per cápita Numérico	Toneladas de RSU producidas por persona, por año	A mayor generación, mayor oportunidad de incorporar tecnologías WtE
GR ₂ : destino Numérico	Diferencia entre el % de RSU enviados a destinos sostenibles (relleno sanitario con recuperación de energía) y el % de RSU enviados a destinos no sostenibles (basurales a cielo abierto, destino desconocido, otros)	A mayor % de RSU enviados a destinos sostenibles, mayor madurez del sistema de gestión y, por lo tanto, mayor oportunidad de incorporar WtE
GR ₃ : cobertura de recolección Numérico	% de población con servicio regular de recolección de RSU	A mayor % de población con servicio, mayor la madurez del sistema de gestión

Tabla 3: Descripción de los indicadores y criterios de valoración que componen el índice

$$IEI = (EI_1 + EI_2 + EI_3 + EI_4 + EI_5) / 5.$$

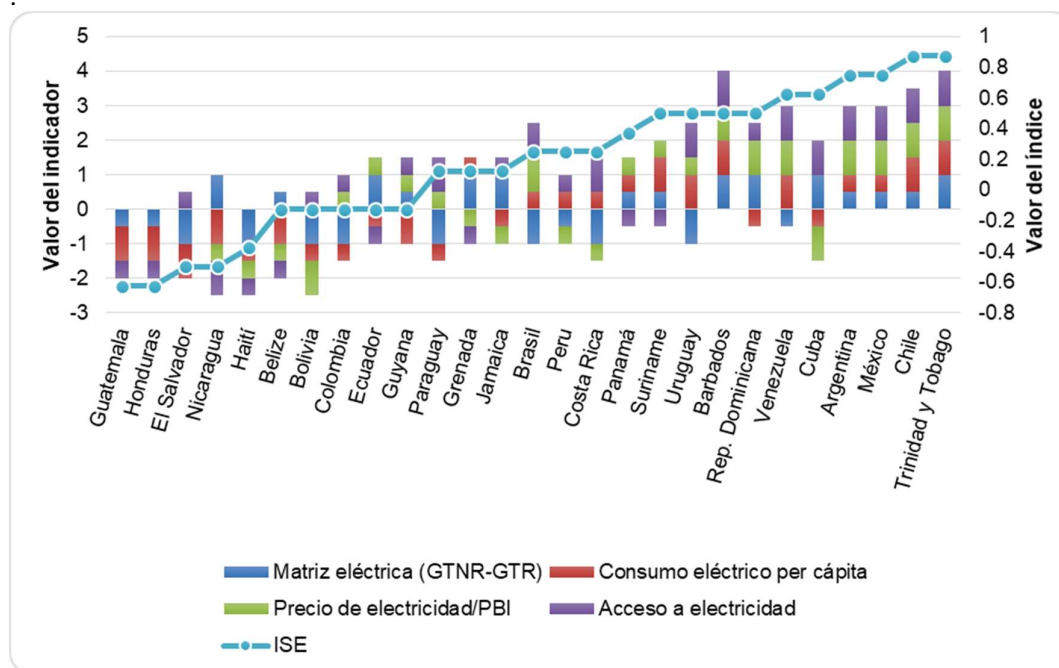
Indicador - Tipo	Descripción	Criterio
EI ₁ : políticas y programas Categorico	Existencia de políticas o programas relacionados con las energías renovables y/o la recuperación de energía a partir de RSU	La existencia de programas y políticas específicas o programas relacionados favorece la incorporación de tecnologías WtE
EI ₂ : leyes sobre energías renovables Categorico	Existencia de leyes relacionadas con la promoción de las energías renovables	La existencia de leyes para la promoción de las energías renovables favorece la incorporación de tecnologías WtE
EI ₃ : incorporación de recuperación energética Categorico	Las normas, planes o políticas de gestión de RSU mencionan a la valorización energética como posible tratamiento	La inclusión de la valorización energética en la normativa, planes o políticas de gestión de RSU favorece la incorporación de tecnologías WtE
EI ₄ : incentivos fiscales Categorico	Existencia de incentivos fiscales para el desarrollo de proyectos de energías renovables	La concesión de incentivos fiscales favorece la incorporación de tecnologías WtE
EI ₅ : PBI per cápita Numérico	PBI per cápita (miles de USD 2011)	A mayor PBI per cápita, mayor capacidad de pago de la población del tratamiento de los RSU con tecnologías WtE y de la energía producida a partir de ellos

Sin embargo, todos los tipos de fuentes han aumentado su capacidad instalada a medida que aumenta la demanda, y la región no está reemplazando las fuentes fósiles por otras renovables. Por lo tanto, las emisiones de CO₂ continúan aumentando. Algunos países están avanzando hacia la diversificación de la matriz de generación para protegerse de los impactos de eventos climáticos como sequías e inundaciones, ya que el 77,5% de la capacidad total acumulada de energía renovable es hidroeléctrica (Messina, 2020).

Con respecto al consumo anual de electricidad per cápita, el promedio fue de

1.894,1 kWh per cápita año⁻¹. Se destacan dos casos extremos: Haití, con un consumo muy por debajo del promedio de 39 kWh per cápita año⁻¹, y Trinidad y Tobago, con un consumo mucho mayor, de 6.043 kWh per cápita año⁻¹.

En cuanto al acceso al servicio eléctrico, en promedio, llega al 96,0% de la población en los diferentes países, con la excepción de Haití, donde alcanza sólo el 38%. Considerando la relación entre el precio de la energía y el PBI per cápita, la media de los países de ALC fue del 1,4%, mientras que en Haití representó el 14% (Castillo et al., 2019)



GTNR: generación térmica no renovable; GTR: generación térmica renovable

Figura 1: Resultados del índice de caracterización del sistema eléctrico (ISE) e indicadores que los componen.

Madurez del sistema de gestión de residuos en ALC

En cuanto al índice IGR, se obtuvieron los valores más bajos para Surinam y Haití, mientras que los mayores IGR fueron

estimados para Chile, Uruguay y Barbados como se ve en la Figura 2.

Un análisis más detallado muestra que, en Haití y Surinam, tres indicadores que componen IGR resultaron negativos,

principalmente debido a que un elevado porcentaje de los RSU termina en basurales a cielo abierto. Además, en el caso de Haití sólo un 11% de la población cuenta con servicio de recolección (Wilson et al., 2015). Solo seis países obtuvieron una valoración positiva en todos los indicadores que componen al índice IGR y corresponden a aquellos que envían más del 60% de sus residuos a rellenos sanitarios con o sin captura de gas, y una cobertura de recolección de RSU superior al 90%. Sin embargo, en ninguno la valorización energética de residuos fue superior al 9% del total generado.

En cuanto a la generación de RSU per cápita en ALC, su promedio es de 0,88 kg

per cápita día⁻¹, pero el 44% de los países de la región están por encima de este valor, y coinciden con los países que obtuvieron un IGR positivo. Los países con generación de RSU per cápita muy por debajo del promedio son aquellos que tienen bajas tasas de recolección, lo que podría indicar que los datos de generación de residuos están subestimados, pero también que el sistema de gestión de residuos es débil. Esta subestimación es probable porque se reporta que alrededor de 145.000 toneladas de residuos terminan diariamente en basurales a cielo abierto o quemas en ALC (ONU Medio Ambiente, 2018b).

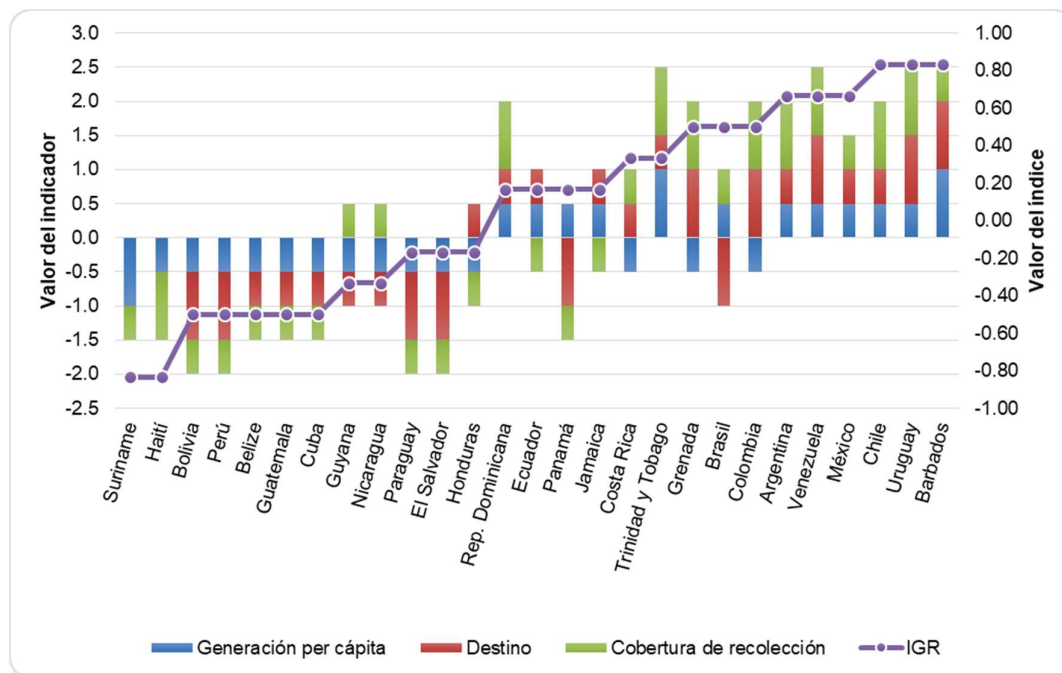


Figura 2: Resultados del índice de madurez del sistema de gestión de residuos (IGR) e indicadores que lo componen.

Para la aplicación de las tecnologías WtE en ALC, es importante tener en cuenta la composición de los RSU, cuya participación de residuos orgánicos oscila entre el 40% y el 70% en los diferentes países (Figura 3)

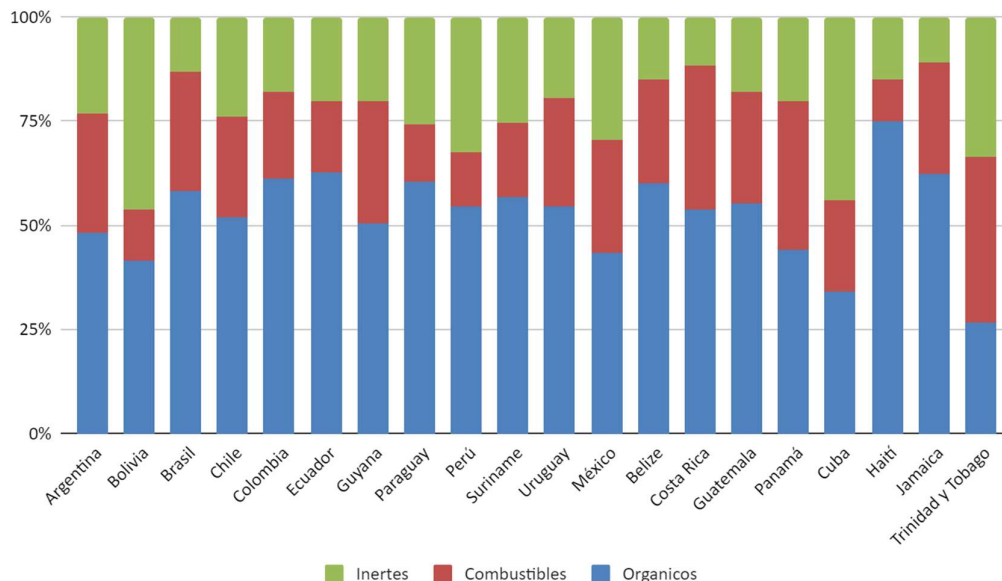


Figura 3: Composición promedio de RSU, con relación a su tratabilidad mediante tecnologías térmicas y bioquímicas, por país. Fuente: elaboración propia en base a (Margallo et al., 2019)

Contexto económico e institucional

Los resultados del índice IEI y la valoración obtenida por los diferentes países se presentan en la Figura 4. Cabe señalar que todos los países alcanzaron valores de índice positivos, obteniendo los valores más altos (0,9) Panamá, Argentina, Chile y México. Esto se debe a que estos países desarrollaron planes estratégicos para incorporar fuentes renovables en sus matrices energéticas, incluyendo incentivos fiscales y/o subsidios para la realización de proyectos.

Paraguay obtuvo el valor más bajo del índice IEI, dado que sus regulaciones no incluyen WtE ni incentivos fiscales para la generación de energía a partir de fuentes renovables. Esto se explica por el hecho de que el 100% de su red eléctrica se basa en energía hidroeléctrica renovable.

En cuanto al indicador PBI per cápita, se observaron valores negativos, aunque con gran diversidad entre los diferentes países.

Por ejemplo, el PBI per cápita en Haití y Panamá en 2011 fue de 2 y 32 mil USD per cápita, respectivamente.

Cabe aclarar que Trinidad y Tobago, Granada, Guyana, Suriname, Belice, Haití y Jamaica fueron excluidos del cálculo del índice IEI, debido a la falta de acceso a información sobre regulaciones específicas sobre energía renovable y gestión de residuos. Sin embargo, todos estos países, junto con Barbados, forman parte de la Comunidad del Caribe (CARICOM), y se consideran países en desarrollo con un fuerte impacto de la actividad turística en su economía. Esto, sumado a la escasez de suelo para la construcción de rellenos sanitarios, dificulta la correcta gestión de los residuos. Por lo tanto, algunos países como Barbados, Jamaica y Haití han considerado proyectos para la incorporación de tecnologías WtE térmicas.

Los países miembros de CARICOM deben implementar políticas con objetivos de transición energética para lograr una producción de electricidad a partir de fuentes renovables del 20%, 28% y 47% para 2017, 2022 y 2027, respectivamente (CARICOM, 2020)

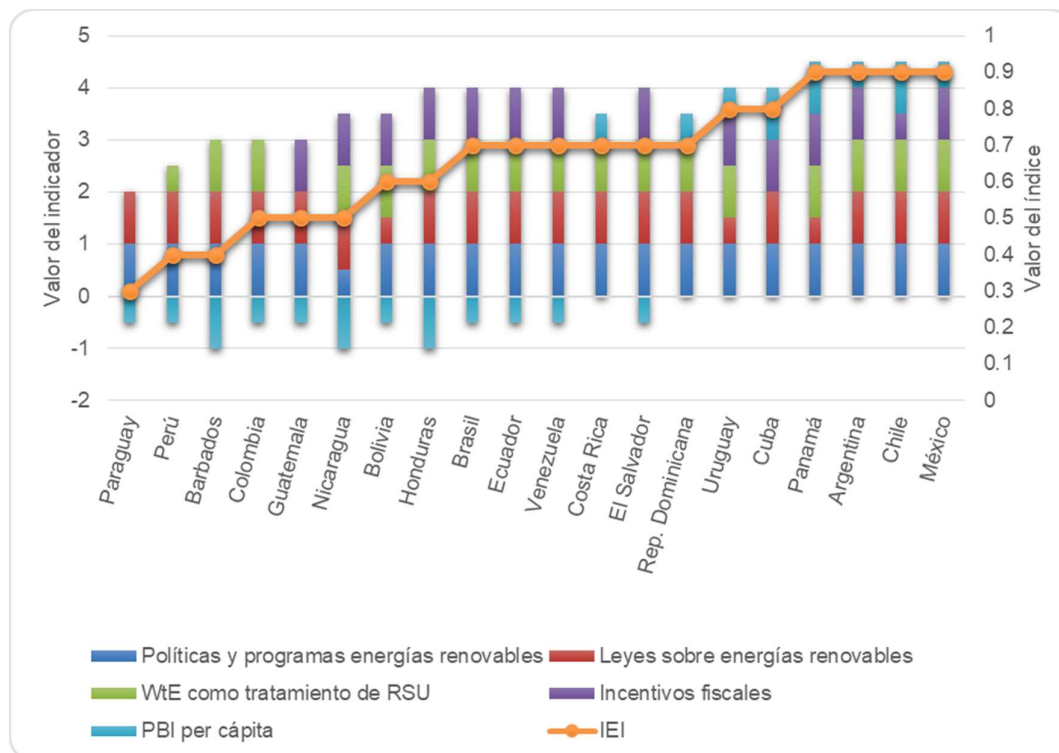


Figura 4: Resultados del índice sobre contexto económico e institucional (IEI) e indicadores que lo componen.

Análisis FODA: Tecnologías de conversión térmica

La información recopilada y procesada en este estudio mostró que estas tecnologías térmicas tienen una implementación limitada en ALC. Las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas para la aplicación de las WtE térmicas en los países de ALC están resumidas en la Figura 5.

En esta región la incineración en masa se aplica principalmente a los residuos industriales, patogénicos o a los agrícolas

y forestales. En Argentina, Brasil y México su aplicación a RSU aún está en estudio debido a sus altos costos. Cabe señalar que, en comparación con los rellenos sanitarios, las plantas WtE térmicas son instalaciones industriales complejas y costosas, cuyos sistemas de control de emisiones gaseosas representan entre un 40-70% del costo total (Ouda et al., 2016). Esto resulta una limitación para lograr sistemas de energía asequibles, uno de los aspectos de la transición energética.

En cuanto a la producción y coprocesamiento de combustible sólido

recuperado a partir de residuos (o SRF, solid recovered fuel por sus siglas en inglés), éste puede ayudar en la transición energética de los sectores industriales intensivos en energía, porque se reemplazan combustibles fósiles, en parte por fuentes renovables (si su formulación incluye residuos de origen biológico), al tiempo que los materiales de origen fósil, como los plásticos, pueden sustituir a los combustibles fósiles tradicionales que, de otro modo, se utilizarían en la generación térmica convencional. En este sentido, esta tecnología ya tiene una fuerte demanda en la industria cementera de Brasil, Chile, Costa Rica, Colombia,

Guatemala, México y República Dominicana, donde el coprocesamiento oscila entre el 7% y el 18% (FICEM, 2018), con más de 70 plantas en operación (EnRes, 2018).

Como se ve en la Figura 3, la participación de materiales combustibles en la composición de RSU en algunos países como Trinidad y Tobago, Panamá, Costa Rica, Argentina, México, Chile y Brasil representan una fortaleza en la implementación de tecnologías térmicas de WtE.

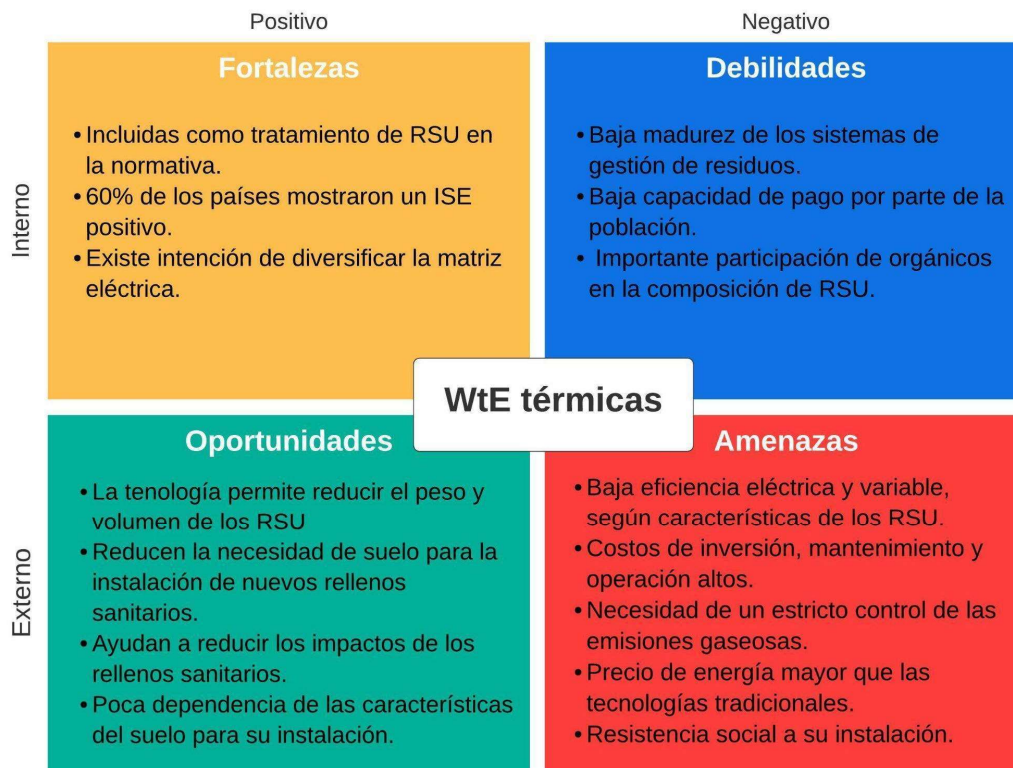


Figura 5: Análisis FODA de tecnologías WtE térmicas.

Análisis FODA: Tecnologías de conversión bioquímica

Digestión anaeróbica

La Figura 6 resume las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de

la aplicación de la digestión anaeróbica en los países de ALC.

En ALC existen numerosos proyectos piloto de digestión anaeróbica (Colombo y Rodríguez Cuevas, 2020; Cutz et al., 2016; EnRes, 2018; FAO, 2019; GAHB, 2017;

Silva-Martínez et al., 2020). Además, el marco legal e institucional actual fomenta la implementación de nuevos proyectos. Esto indica que existe un creciente interés en el desarrollo de *know-how* para la implementación de esta tecnología bajas en intensidad de carbono. De hecho, el desarrollo del *know-how* se considera uno de los principales desafíos. Asimismo, considerando la alta fracción de orgánicos en los RSU generados (50%) en la región (Figura 3), es claro que existe la necesidad de desarrollar tratamientos de recuperación energética de esta fracción. Además, dado que muchos de los países enfrentan dificultades en la disponibilidad de tierras para nuevos rellenos sanitarios, esta tecnología se vuelve deseable en la región del Caribe, y en las grandes metrópolis de ALC continental.

Por otro lado, considerando que uno de los pilares de la transición energética es el acceso a la energía eléctrica y que, de acuerdo con el análisis anterior, algunos

países de ALC aún deben aumentar dicha tasa, en áreas no integradas a los sistemas eléctricos la instalación de plantas de digestión anaeróbica de baja escala puede colaborar en este objetivo. Además, estas plantas pueden proporcionar soluciones más eficientes que el uso de fuentes primarias para cocinar o iluminar, al tiempo que permite aprovechar los recursos disponibles localmente, que de otra manera se perderían. De esta forma, este tipo de tecnologías pueden contribuir a reducir la pobreza energética, otro de los aspectos de la transición energética.

Sin embargo, esta tecnología requiere de un sistema de recolección diferenciada de los RSU orgánicos para operar de forma eficiente. Como se vio con el indicador IGR, muchos países aún cuentan con sistemas de recolección general de baja cobertura, lo que dificulta pensar en la aplicación de sistemas de recolección diferenciada



Figura 6: Análisis FODA para las tecnologías de digestión anaeróbica.

Aprovechamiento de gas de relleno sanitario (GRS)

Las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de la aplicación del aprovechamiento de GRS en los países de ALC se presentan en la Figura 7.

Los resultados de la presente investigación mostraron una alta dependencia de la región respecto de la disposición final de RSU en vertederos de todo tipo. Los sitios de disposición final que no aprovechan el GRS presentan una oportunidad, no solo para la mejora y saneamiento de estos sitios, sino también para el uso energético del GRS, aportando a la transición energética. A su vez, tales iniciativas pueden significar un retorno económico, no solo por la inyección de energía a la red eléctrica, sino también por la posibilidad de vender bonos de carbono del mecanismo de desarrollo limpio.

En ALC, esta tecnología se está implementando en Argentina, Brasil, Ecuador, El Salvador, Colombia, México, Perú y Uruguay, con aproximadamente 20 vertederos donde se captura GRS para uso energético (ONU Medio Ambiente, 2018b). Entre los ejemplos de este aprovechamiento, en Argentina, alrededor del 1% de la capacidad eléctrica instalada a partir de fuentes renovables utiliza el GRS producido por las grandes ciudades; en Brasil, varios proyectos de rellenos sanitarios con captura de GRS han sido financiados parcialmente por la venta de bonos de reducción de emisiones a través

del Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques del Banco Mundial; y, en Ciudad de México, un estudio sobre la factibilidad de la captura de GRS de un relleno sanitario cerrado en 2011 mostró que se podrían generar alrededor de 250 GWh (C40 Cities Climate Leadership Group, 2011).

Respecto de las debilidades, la baja cobertura de la recolección de RSU fue un factor que influyó negativamente en los resultados del índice IGR, evidenciando una madurez deficiente de los sistemas de gestión en la mayoría de los países. Aunque la mayoría de las fuentes renovables ofrecen una menor densidad energética que las derivadas de combustibles fósiles, la bioenergía se presenta como un componente importante de la transición energética. En ALC, una fracción importante de los RSU corresponde a materiales de origen biológico, que se consideran fuentes de energía renovables, independientemente de que se utilicen mediante tecnologías térmicas o bioquímicas. A modo de ejemplo, a partir de los datos publicados por CEPAL (2021) y ONU Medio Ambiente (2018), se estima que aproximadamente el 2% de los 1,6 millones de GWh generados en ALC en 2018 podrían haberse cubierto con energía renovable a partir de la fracción orgánica de los RSU mediante digestión anaeróbica. La generación a partir de fuentes renovables para ese año, sin contar la hidroeléctrica, fue del 10%.



Figura 7: Análisis FODA para tecnologías de aprovechamiento de gas de relleno sanitario.

CONCLUSIONES

El contexto de ALC para la inclusión de tecnologías WtE, como herramienta de la transición energética, es diverso. Argentina, México, Chile y Panamá muestran contextos favorables, particularmente para WtE térmicas, mientras que Brasil muestra un gran desarrollo en la producción de SRF. Dichas tecnologías deben superar barreras relacionadas principalmente con aspectos económicos debido a sus altos costos, y resistencia social a su instalación. En los países insulares, estas tecnologías se presentan como una alternativa de tratamiento a la disposición final en rellenos sanitarios, que reduciría tanto la presión por el uso de los suelos, cada vez más escasos, como la dependencia de los combustibles fósiles importados.

Las tecnologías WtE bioquímicas ya se están aplicando, y en particular para residuos agrícolas y forestales. Para utilizar los RSU es necesario mejorar los sistemas de recolección e implementar la recolección diferenciada de la fracción orgánica, lo que contribuiría también a aumentar las tasas de reciclaje de materiales. En el caso particular de los sistemas eléctricos aislados, éstos presentan una oportunidad para aprovechar los recursos locales para la generación de electricidad, es decir, los RSU.

El uso de tecnologías de recuperación de gases en rellenos sanitarios existentes constituye un paso hacia la transición energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de estos sitios.

De acuerdo a cómo las tecnologías WtE se implementen, pueden contribuir, tanto a la transición energética, como al cumplimiento de los compromisos asumidos por los países en el Acuerdo de París y al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, en particular los objetivos N° 7 y 12.

Las tecnologías WtE pueden impulsar la sinergia entre el sistema de gestión de residuos y el sistema energético, pero bajo un estricto control sobre los posibles impactos ambientales. Sin embargo, algunos países de ALC tienen aún sistemas de gestión de residuos a desarrollar que hace difícil la implementación de WtE, al menos, en el

corto plazo. El período de transición estará determinado por las inversiones de capital público, privado y las condiciones de partida.

Un aspecto importante de la transición energética es el social, ya que debe centrarse en las personas y las políticas a implementar deben ser inclusivas. La inclusión de tecnologías WtE en los sistemas de gestión de residuos en ALC debe complementar y no competir con el reciclaje que realizan los trabajadores informales que deben ser incluidos en las políticas de gestión de RSU. Este aspecto no se incluyó en el análisis y puede ser una línea para futuros trabajos

BIBLIOGRAFÍA

C40 Cities Climate Leadership Group. (2011, Diciembre 22). *Cierre del Vertedero Bordo Poniente ayudará a «ecologizar» la Ciudad de México*. https://www.c40.org/press_releases/press-release-cierre-del-vertedero-bordo-poniente-ayudar%C3%A1-a-ecologizar-la-ciudad-de-m%C3%A9xico

CARICOM. (2020, octubre 1). *CDF, IRENA Collaborate to Boost Low-Carbon Investments in Caribbean*. Cooperation will support renewable energy and energy efficiency drive as Caribbean looks to transition away from fossil fuel dependency.

Castillo, T., García, F., Mosquera, L., Rivadeneira, T., Segura, K., Yujato, M., Balseca, V., Delgado, D., Guerra, L., Wook, J. G., Choi, J., & Simbaña, V. (2019). *Panorama Energético de América Latina y el Caribe 2019* (OLADE, Ed.; Primera). OLADE.

Colombo, C. V., & Rodríguez Cuevas, A. (2020). Biogas generation from different organic waste: Case studies of Bioremediation and community development in Argentina and Dominican Republic. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.211>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2021). *Anuario estadístico de América Latina y el Caribe 2020*. <http://hdl.handle.net/11362/46739>

Cutz, L., Haro, P., Santana, D., & Johnsson, F. (2016). Assessment of biomass energy sources and technologies: The case of Central America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1411-1431. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.322>

EnRes. (2018). *Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de Residuos Urbanos en México*. <https://www.giz.de/de/downloads/giz2019-ES-EnRes-Proyectos-de-Aprovechamiento.pdf>

FAO. (2019). *RELEVAMIENTO NACIONAL DE BIODIGESTORES*. FAO. www.fao.org

Federación Interamericana del Cemento (FICEM). (2018). *Informe estadístico 2018*. <https://ficem.org/uso-estadisticas/>

GAHB - Mercosur Ad Hoc Group on Biofuels. (2017). *Mercosur Biogas and Biomethane Report*. <http://task37.ieabioenergy.com/files/daten-redaktion/download/publications/country-reports/2016/Mercosur%202016.pdf>

International Energy Agency (IEA). (2018). *World Energy Outlook 2018*. www.iea.org/weo

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). *WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK. 1.5° C PATHWAY*. www.irena.org/publications

Jaber, J. O., Elkarmi, F., Alasis, E., & Kostas, A. (2015). Employment of renewable energy in Jordan: Current status, SWOT and problem analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 490-499. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.050>

Kamran, M., Fazal, M. R., & Mudassar, M. (2020). Towards empowerment of the renewable energy sector in Pakistan for sustainable energy evolution: SWOT analysis. *Renewable Energy*, 146, 543-558. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.165>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, R. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>

Margallo, M., Ziegler-Rodriguez, K., Vázquez-Rowe, I., Aldaco, R., Irabien, Á., & Kahhat, R. (2019). Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. En *Science of the Total Environment* (Vol. 689, pp. 1255-1275). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.393>

Martínez Arce, E., Daza, D., Tello Espinoza, P., Soulier Faure, M., & Terraza, H. (2010). *Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe 2010*. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Informe-de-la-evaluaci%C3%B3n-regional-del-manejo-de-residuos-s%C3%B3lidos-urbanos-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-2010.pdf>

Messina, D. (2020). *Contribuciones determinadas a nivel nacional del sector eléctrico en América Latina y el Caribe: Análisis de la transición hacia el uso sostenible de las fuentes energéticas*. www.cepal.org/

ONU Medio Ambiente. (2018a). *Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe* (O. para A. L. y el C. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Ed.).

ONU Medio Ambiente. (2018b). *Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe* (O. para A. L. y el C. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Ed.).

Ouda, O. K. M., Raza, S. A., Nizami, A. S., Rehan, M., Al-Waked, R., & Korres, N. E. (2016). Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 328-340. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.005>

Pablo-Romero, M. D. P., & De Jesús, J. (2016). Economic growth and energy consumption: The Energy-Environmental Kuznets Curve for Latin America and the Caribbean. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1343-1350. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.029>

Silva-Martínez, R. D., Sanches-Pereira, A., Ortiz, W., Gómez Galindo, M. F., & Coelho, S. T. (2020). The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: Challenges and opportunities. *Renewable Energy*, 156, 509-525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.056>

UN Habitat. (2020). *World Cities Report The Value of Sustainable Urbanization*. https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf?utm_medium=website&utm_source=plataformaarquitectura.cl

Wilson, D. C., Rodic, L., Modak, P., Soos, R., Carpintero Rogero, A., Velis, C., Iyer, M., & Simonett, O. (2015). *Global waste management outlook* (T. Cannon, Ed.). United Nations Environment Programme.

Enlaces a sitios web de los gobiernos y organizaciones de los países de ALC:

Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (2010). *Ley N°8839 para la Gestión Integral de Residuos*. https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=68300&nValor3=83024&strTipM=TC

Asamblea Legislativa Panamá. (2004). *Ley N°45 - Ley para promover las energías renovables*. <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC076707>

Asamblea Legislativa Plurinacional Bolivia. (2015). *Ley N°755 de Gestión Integral de Residuos*. https://sea.gob.bo/digesto/CompendioII/N/142_L_755.pdf

Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela. (2010). *Ley de Gestión Integral de la Basura*. <https://www.asambleanacional.gob.ve/leyes/sancionadas/ley-de-gestion-integral-de-la-basura#:~:text=Esta%20ley%20tiene%20por%20objeto,forma%20sanitaria%20y%20ambientalmente%20segura>

Congreso de Colombia. (2001). *Ley 697 Uso racional y eficiente de la energía*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>

Congreso de la Nación Paraguaya. (2006). *Ley N°3009 de la Producción y Transporte Independiente de Energía Eléctrica (PTIEE)*. <https://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/leyes/Ley%203009%20PTIEE.pdf>

Congreso de la Nación Paraguaya. (2009). *Ley N°3956 Gestión Integral de los Residuos Sólidos en la República del Paraguay*. <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/3208/gestion-integral-de-los-residuos-solidos-en-la-republica-del-paraguay#:~:text=Se%20proh%C3%ADbe%20la%20quemado,las%20etapas%20de%20la%20gesti%C3%B3n>

Congreso de la República de Guatemala. (2003). *Decreto 52-2003 Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de Energía Renovable*. <https://www.cnee.gob.gt/pdf/marco-legal/LeydelIncentivosEnerg%C3%ADaRenovable2014.pdf>

Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos. (2012). *Ley General de Cambio Climático*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>

Consejo de Estado Cuba. (2019). *Decreto Ley N°345 del desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía*. <https://www.gacetaoficial.gob.cu/es/gaceta-oficial-no-95-ordinaria-de-2019>

Consejo Nacional de Energía, & Gobierno de El Salvador. (n.d.). *Política Energética El Salvador 2020—2050*. Retrieved May 16, 2023, from <https://www.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2021/12/PEN2050.pdf>

Gobierno de Uruguay. (2019). *Ley N°19829 Normas para la gestión integral de residuos*. <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/19829-2019>

Gobierno de Venezuela. (2019). *Plan de la Patria 2019-2025 de Venezuela*. <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes/plan-de-la-patria-2019-2025-de-venezuela>

Johannes Kissel. (2017). *Programa Energías Renovables (PEERR) Bolivia*. <https://energypedia.info/images/7/7e/PEERR-FACTSHEET-2017.pdf>

Ley 532 para la promoción de generación eléctrica con fuentes renovables. (2005). Nicaragua. *Ley N°532 para la promoción de generación eléctrica con fuentes renovables*. https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1067&context=la_energy_policies#:~:text=OBJETO%3A%20La%20presente%20Ley%20tiene,de%20los%20proyectos%20de%20generaci%C3%B3n

Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos Ecuador. (2016). *Agenda Nacional de Energía 2016-2040*. <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00362.pdf>

Ministerio de Ambiente y Energía MINAE, & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD. (2015). *Plan Nacional de Energía 2015-2030 Costa Rica*. https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2018/08/VII_Plan_Nacional_de_Energia_2015-2030.pdf

Ministerio de Economía Chile. (2008). *Ley N°20257*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=270212&idVersion=2013-10-22&idParte=802162>

Ministerio de Energía, & Gobierno de Chile. (n.d.-a). *Energía 2050 Política Energética de Chile*. Retrieved May 11, 2023, from https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf

Ministerio de Energía, & Gobierno de Chile. (n.d.-b). *Ruta Energética 2018-2022*. Retrieved May 11, 2023, from <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2018/05/rutaenergetica2018-2022.pdf>

Ministerio de Industria, E. y M. U. Uruguay. (2013). *Biovalor*. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/programas/biovalor>

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) El Salvador. (2020). *Decreto N° 527.- Ley de gestión integral de residuos y fomento al reciclaje*. <https://cidoc.marn.gob.sv/documentos/decreto-no-527-ley-de-gestion-integral-de-residuos-y-fomento-al-reciclaje/>

Ministerio del Ambiente, A. y T. E. E. (n.d.) Ecuador. *Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos – PNGIDS*. Retrieved May 11, 2023, from <https://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>

Ministerio del Ambiente Perú. (2000). *Ley N°27314 Ley General de Residuos Sólidos*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-general-residuos-solidos#:~:text=La%20Ley%2027314%20se%20aplica,sociales%20y%20de%20la%20poblaci%C3%B3n>

Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania, & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México; Secretaría de Energía (SENER) de México. (2014). *Aprovechamiento energético de residuos urbanos*. <https://www.giz.de/en/worldwide/33989.html>

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (2015). *Island Energy Snapshots*. <https://www.energy.gov/eere/island-energy-snapshots>

Poder Ejecutivo Nicaragua. (2005). *Decreto Ejecutivo N°47-2005 Política Nacional sobre Gestión Integral de Residuos Sólidos*. <http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/b34f77cd9d23625e06257265005d21fa/d132318726051846062570ab0064017d?OpenDocument>

Poder Ejecutivo Perú. (2010). *Decreto Legislativo N°1002 de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables*. https://www.minem.gob.pe/archivos/legislacion-9ozj22z9ap5zz33z-DL_de_promocion_de_la_inversion_para_la_generacion_de_electricidad_con_el_uso_de_energias_renovables_1002.pdf

Poder Legislativo Honduras. (2007). *Decreto 70-2007 Ley de promoción a la generación de energía eléctrica con recursos renovables*. <https://www.tsc.gob.hn/biblioteca/index.php/leyes/65-ley-de-promocion-a-la-generacion-de-energia-electrica-con-recursos-renovables>

Presidência da República, Casa Civil, & Subchefia para Assuntos Jurídicos Brasil. (2010). *Ley N°12305 Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

Presidência da República, & Subchefia para Assuntos Jurídicos Brasil. (2017). *Ley N°13576 Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales México. (2012). *Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PNPGR)*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187438/pnpgir_2009-2012.pdf

Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente Honduras. (2010). *Acuerdo Ejecutivo 1567-2010 Reglamento para el Manejo Integral de Residuos Sólidos*. <https://www.tsc.gob.hn/biblioteca/index.php/reglamentos/202-reglamentopara-el-manejo-integral-de-residuos-solidos>

Secretaría Nacional de Energía, & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en Panamá. (2016). *Plan Energético Nacional 2015-2050 Panamá*. <https://www.senacyt.gob.pa/wp-content/uploads/2018/12/3.-Plan-Energetico-Nacional-2015-2050-1.pdf>