

GENERACIÓN DE BIOENERGÍA A PARTIR DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS



JESÚS LUZMILA BENIQUE CARREÓN
CARLOS ENRIQUE COACALLA CASTILLO
ALBERTO OCTAVIO CARRANZA LÓPEZ
JOSE EUGENIO CHAFLOQUE CAPUÑAY
REYDER ALEXANDER LAMBRUSCHINI ESPINOZA

GENERACIÓN DE BIOENERGÍA A PARTIR DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS



JESÚS LUZMILA BENIQUE CARREÓN
CARLOS ENRIQUE COACALLA CASTILLO
ALBERTO OCTAVIO CARRANZA LÓPEZ
JOSE EUGENIO CHAFLOQUE CAPUÑAY
REYDER ALEXANDER LAMBRUSCHINI ESPINOZA

Editor Chefe

Ivanio Folmer

Bibliotecária

Aline Graziele Benitez

Revisora Técnica

Gabriella Eldereti Machado

Diagramação

Gabriel Eldereti Machado

Imagem capa

www.canva.com

Revisão

Organizadores e Autores(as)

Conselho Editorial

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva - UNIDAVI

Prof. Dr. Astor João Schönnell Júnior - IFFAR

Prof. Dr. Alan Ricardo Costa - UFRR

Profa. Dra. Andréia Bulaty -UNESPAR

Profa. Dra. Carla da Conceição de Lima - UFVJM

Prof. Dr. Camilo Darsie de Souza - UNISC

Profa. Dra. Clarice Caldeira Leite - UFRGS

Profa. Dra. Cecilia Decarli - UFRGS

Prof. Dr. Carlos Adriano Martins - UNICID

Prof. Dr. Christian Dennys Monteiro de Oliveira - UFCE

Profa. Dra. Dayse Marinho Martins - UFMA

Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos - UEL

Prof. Dr. Dioni Paulo Pastorio -UFRGS

Prof. Dr. Douglas Manoel Antonio de Abreu Pestana dos Santos - FASESP

Profa. Dra. Elane da Silva Barbosa - UERN

Profa. Dra. Elen Gomes Pereira - IFBA

Profa. Dra. Francielle Benini Agne Tybusch - UFN

Prof. Dr. Francisco Odécio Sales - IFCE

Prof. Dr. Francisco Ricardo Miranda Pinto - UFCAT

Prof. Dr. Gilvan Charles Cerqueira de Araújo - UCB

Prof. Dr. Ismar Inácio dos Santos Filho - UFAL

Prof. Dr. Leonardo Bigolin Jantsch -UFSM

Profa. Dra Liziany Müller Medeiros - UFSM

Profa. Dra Marcela Mary José - UFRB

Prof. Dr. Mateus Henrique Köhler - UFSM

Prof. Dr. Michel Canuto de Sena - UFMS

Profa. Dra. Mônica Aparecida Bortolotti - UNICENTRO

Prof. Nilton David Vilchez Galarza - UPLA

Prof. Dr. Olavo Barreto de Souza - UEPB

Prof. Dr. Rafael Nogueira Furtado - UFABC

Prof. Dr. Roberto Araújo da Silva Vasques Rabelo - UNILUS

Prof. Dr. Rodrigo Toledo - USCS

Prof. Dr. Rodolfo Rodrigues de Souza - UERJ

Prof. Dr. Sidnei Renato Silveira - UFSM

Prof. Dr. Thiago Ribeiro Rafagnin - UFOB

Prof. Dr Tomás Raúl Gómez Hernández - UCLV

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Generación de bioenergía a partir del manejo de
residuos sólidos urbanos [livro eletrônico] /
Jesús Luzmila Benique Carreón... [et al.]. --
Santa Maria, RS : Arco Editores, 2024.

PDF

Outros autores: Carlos Enrique Coacalla
Castillo, Alberto Octavio Carranza López, Jose
Eugenio Chafloque Capuñay, Reyder Alexander
Lambruschini Espinoza.

Bibliografia.

ISBN 978-65-5417-365-0

1. Bioenergía 2. Energía - Fuentes alternativas
3. Fuentes energéticas renovables 4. Residuos
sólidos - Aspectos ambientales 5. Residuos - Gestión
I. Carreón, Jesús Luzmila Benique. II. Castillo,
Carlos Enrique Coacalla. III. López, Alberto
Octavio Carranza. IV. Capuñay, Jose Eugenio
Chafloque. V. Espinoza, Reyder Alexander
Lambruschini.

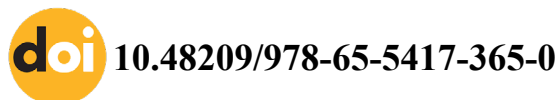
24-231447

CDD-621.042

Índices para catálogo sistemático:

1. Resíduos sólidos : Fontes energéticas renováveis : Tecnologia 621.042

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129



Este livro é o resultado de uma pesquisa científica em
atividades de ciência e tecnologia.

O trabalho foi revisado por pares acadêmicos externo antes
de ser publicado.



CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO I.....	14
LA ENERGÍA DE LA BIOMASA.....	14
1.1. Conceptos generales de la biomasa y la bioenergía.....	15
1.2. El proceso de fotosíntesis en la obtención de energías.....	18
1.3. Clasificación, características y tipos de biocarburantes.....	21
1.4. Procesos generadores de biomasa en energía.....	25
1.5. Beneficios de los biocombustibles como fuente de energía renovable	28
1.6. Impacto económico, social y ambiental de los biocarburantes....	31
CAPÍTULO II.....	35
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	35
2.1. Definición de los residuos urbanos.....	36
2.2. Clasificación de los desechos sólidos domésticos.....	38
2.3. Residuos sólidos urbanos y su impacto medioambiental.....	41
2.4. El rol municipal en la gestión de RSU.....	43
2.5. Los rellenos sanitarios, ¿solución o problema?.....	45
2.6. Desafíos en la gestión sostenible de los residuos sólidos.....	48
2.7. Nivel de conciencia ecológica en la opinión pública.....	49
CAPÍTULO III.....	52
BIOENERGÉTICA DE LOS DESECHOS URBANOS.....	52
3.1. Los residuos sólidos urbanos como insumo biomásico.....	53

3.2. ¿Qué es el biogás? Aspectos principales.....	55
3.3. Proceso de obtención del biogás.....	57
3.4. Ventajas y aplicaciones del biogás.....	59
3.5. El futuro del mercado de energía con biomasa sólida.....	61
CAPÍTULO IV.....	64
GENERACIÓN DE BIOENERGÍA A PARTIR DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA..	64
4.1. Metodología.....	67
4.2. Resultados.....	69
4.3. Discusión.....	75
4.5. Conclusiones.....	79
CAPÍTULO V.....	82
LA BIOENERGÍA EN TERRITORIO LATINOAMERICANO.....	82
5.1. Panorama bioenergético en América Latina y el Caribe.....	83
5.2. Amenazas al desarrollo de proyectos bioenergéticos en la región.....	85
5.2. La fotosíntesis artificial: la hoja biónica y los biopaneles solares.....	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de biocombustibles según la materia prima usada.....	22
Tabla 2. Formas de transformación de la biomasa.....	27
Tabla 3. Clasificación de residuos sólidos por colores.....	40
Tabla 4. Criterios de elegibilidad.....	68
Tabla 5. Artículos seleccionados para la revisión de publicaciones.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de selección. Flujograma Prisma.....	70
Figura 2. Tipo de investigaciones presentes en los documentos revisados...	76
Figura 3. Mapa bibliográfico de coocurrencia de palabras clave.....	77

RESUMEN

Durante los últimos años, se ha observado a nivel mundial cómo la generación de los residuos sólidos ha ido en aumento, esto como consecuencia del crecimiento poblacional en las áreas urbanas y el desarrollo económico de las naciones. Esta situación ha traído consigo una crisis de basura, debido a un manejo incorrecto de esta y al poco conocimiento de las distintas opciones existentes para disminuir la generación de desechos o su reutilización para generar bioenergía. El uso de tecnología para aprovechar de manera sostenible los residuos sólidos de áreas urbanas representa una excelente alternativa para la generación de bioenergía. Este estudio se plantea como objetivo examinar la literatura sobre las tecnologías utilizadas para la generación de bioenergía a partir del manejo de residuos sólidos urbanos. Se realizó una revisión sistemática y la búsqueda se apoyó en la metodología Prisma. Los resultados mostraron que entre las técnicas más utilizadas para la generación de bioenergía destacan el procesamiento anaeróbico, las fuentes neutras en CO₂ y la tecnología de pirólisis. Se concluyó que las tecnologías para generar bioenergía agregan enormes cantidades de MW a la capacidad eléctrica instalada; de igual manera, los residuos de biomasa generan energía, la cual beneficiará el aprovechamiento de la energía renovable. Asimismo, las tecnologías que usan biomasa de residuos sólidos urbanos (RSU) como materia prima generan biocombustibles.

Palabras clave: bioenergía, manejo de desechos, residuos sólidos urbanos, tecnología.

ABSTRACT

In recent years, the generation of solid waste has been increasing worldwide as a consequence of population growth in urban areas and the economic development of nations. This situation has brought with it a waste crisis, due to incorrect waste management and a lack of knowledge of the different options available to reduce waste generation or its reuse to generate bioenergy. The use of technology to make sustainable use of solid waste from urban areas represents an excellent alternative for the generation of bioenergy. The aim of this study was to review the literature on the technologies used to generate bioenergy from municipal solid waste management. A systematic review was carried out and the search was supported by the Prisma methodology. The results showed that the most widely used techniques for bioenergy generation include anaerobic processing, CO₂ neutral sources and pyrolysis technology. It was concluded that bioenergy generation technologies add huge amounts of MW to the installed electricity capacity; similarly, biomass residues generate energy, which will benefit renewable energy utilisation. Likewise, technologies using municipal solid waste (MSW) biomass as feedstock generate biofuels.

Keywords: bioenergy, waste management, municipal solid waste, technology

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen enormes dificultades relacionadas con la sostenibilidad global, lo cual obliga a adoptar prácticas ecológicas a través de un adecuado manejo integral de residuos. Estas prácticas, según Limache (2021), incluyen medidas de gobierno, financieras y de planificación para la gestión de residuos en todas las etapas de su generación. En relación con los procedimientos para tratar los residuos, resulta significativo considerar el uso de herramientas y procesos para el control efectivo (Merchán *et al.*, 2020). Es preciso destacar que los procedimientos son distintos para el abordaje de cada tipo de residuo sólido; por ello, deben ser tratados responsablemente, utilizando sistemas y protocolos que reduzcan y apliquen medidas de mitigación (Najar *et al.*, 2022).

Autores como Carvajal *et al.* (2021) mencionan que los residuos sólidos pueden ser de diversa naturaleza, por ejemplo, domésticos, comerciales, sanitarios e industriales. Es preciso acotar que, en la actualidad, y según lo que sostienen Mumtaz *et al.* (2023), se utilizan diversos métodos para el manejo de estos materiales, como la conversión de la basura plástica en combustibles de alto contenido energético, que son los más ventajosos a largo plazo. Por otro lado, Carvajal *et al.* (2021) sugieren que, si los sobrantes o residuales no pueden reutilizarse o reaprovecharse, deben eliminarse de la forma menos perjudicial para el medioambiente.

Vale destacar que el sector agroindustrial y el sector urbano representan fuentes importantes para la producción de biomasa residual, pues se requiere una transformación fisicoquímica de la materia de dichos productos para el origen de la biomasa. Tales residuos pueden aprovecharse y así generar energía renovable con el propósito de sustituir la energía derivada de los combustibles

fósiles. Los residuos sólidos urbanos se encuentran compuestos, por lo general, de papel, alimentos, madera, carbón vegetal, aguas residuales y desechos vegetales, componiendo una fracción orgánica para generar la biomasa creando sustancias volátiles, por ejemplo, el dióxido de carbono y el metano (Triviño *et al.*, 2021).

Se estima que, en todo el mundo, cada año se generan 2010 millones de toneladas de desechos sólidos municipales (Mena, 2022), lo que representa un promedio de 270 kg por habitante. Por su parte, en América Latina y el Caribe produce cerca de 216 millones de toneladas de residuos sólidos municipales (RSM) al año, de los cuales 52 % corresponde a residuos orgánicos, 19 % lo componen materiales que pueden ser reciclados (vidrio, papel, cartón y metales) y un 12 % lo constituyen los plásticos (Correal *et al.*, 2021). Así, el porcentaje referido a los residuos sólidos urbanos (RSU) se puede disponer para un aprovechamiento energético; y ya que la biomasa es necesaria para la generación de bioenergía, resulta significativa su mención en el proceso de aprovechamiento de dichos residuos.

Abellán (2018) señala que el manejo de residuos sólidos consiste en un sistema que permite la articulación de diferentes procesos, los cuales son interdependientes el uno del otro, por ejemplo, recolección, separación y almacenamiento, transporte, intermediación y valorización, aprovechamiento energético y disposición final. En lo concerniente al aprovechamiento energético, destacan las bioenergías, que representan una serie de fuentes de energía renovable, las cuales pueden mitigar alrededor de un 14 % de emisiones de gases de efecto invernadero del planeta. Además, durante la descomposición natural de la biomasa que produce biogás, se han desarrollado una serie de tecnologías, las cuales ayudan a deshacerse de grandes cantidades de residuos orgánicos, aprovechándose de esta manera el biogás como biocombustible (Barrena *et al.*, 2019).

El uso de estas tecnologías se encuentra enmarcado dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas

(2018); específicamente, en el referido a la energía (ODS 7), que busca garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos. Asimismo, muestra que es necesario incrementar la energía que se origina en fuentes renovables, y promueve aquellas tecnologías que proporcionan utilidad energética. Este objetivo, en resumen, plantea un acceso universal a la energía, que las energías renovables puedan desarrollarse, y una mejora en la eficiencia energética y tecnológica, así como en el despliegue de los sistemas energéticos (Organización de las Naciones Unidas, 2018).

Es preciso reconocer que el logro de un desarrollo sostenible depende de muchos factores y, por lo tanto, solo la articulación de los principales actores facilitará orientar acciones en búsqueda de soluciones con mayor eficacia, por ello, el presente estudio resulta de gran valor debido a que permite ofrecer una extensa información bibliográfica actualizada sobre las tecnologías que en la actualidad son utilizadas para generar bioenergías partiendo del correcto manejo de RSU.

El objetivo general es conocer las tecnologías utilizadas para la generación de bioenergía a partir del manejo de RSU. Las preguntas de investigación que guían este análisis son las siguientes: ¿cómo ha evolucionado la producción científica sobre la generación de bioenergía a partir del manejo de RSU de acuerdo a año, idiomas, autores, revistas y países?, ¿cuáles son las bases de datos que tienen mayor número de publicaciones referidas a la generación de bioenergía con el manejo de RSU? y ¿cuáles son las tecnologías que en la actualidad son utilizadas para generar bioenergía utilizando los RSU?

CAPÍTULO I

LA ENERGÍA DE LA BIOMASA

En la rutina diaria, los seres humanos consumen productos que una vez usados terminan siendo desechados; así ha ocurrido desde que las personas habitan la Tierra. Durante estos continuos procesos biológicos surge la biomasa, un concepto inusual pero que hoy en día adquiere una importancia significativa como alternativa para crear energía. Gracias a su transformación y aplicación global, es una manera efectiva de contribuir a un planeta más sostenible pues está fabricado con materia orgánica. De esta manera, es posible obtenerla de diversas procedencias como de restos de comida, los extractos de la industria agrícola o los excrementos de animales herbívoros, procurando un descanso a la capacidad de la naturaleza para satisfacer las necesidades humanas. Hoy en día, se usa para generar calor en procesos industriales, aunque también es muy popular calentando viviendas u oficinas.

La biomasa brinda un sinfín de oportunidades para obtener una diversidad de productos como el carbón vegetal, combustibles líquidos o gases. Si bien la biomasa es una fuente energética inagotable, presenta algunos inconvenientes que impiden aprovechar todo su potencial debido sobre todo a la falta de una tecnología de punta para su tratamiento y la falta de espacio para su almacenamiento, y otros más. Sin embargo, a diferencia de los combustibles fósiles, contamina muy poco el medioambiente y sus emisiones tienen un impacto leve o casi nulo en la capa de ozono. En definitiva, la biomasa desarrolla un papel relevante no solo en el objetivo de proporcionar alternativas energéticas ecoa-

migables, también sirve de ayuda en la regeneración y conservación de ecosistemas, la recuperación de los suelos, además de impulsar el sector económico y generar empleos.

1.1. Conceptos generales de la biomasa y la bioenergía

La matriz energética de muchos países se compone esencialmente del combustible fósil, alto en emisiones de dióxido de carbono y metano, además del gas natural, petróleo y el carbón. Sin embargo, son fuentes de energía finitas generadas en el subsuelo durante millones de años, que no se pueden regenerar o lo hacen en forma especialmente lenta. A pesar de ello, comprende el 80 % de la demanda de energía primaria en todo el planeta, y representa aproximadamente dos tercios de las emisiones globales de CO₂; una tendencia peligrosa según Foster & Elzinga (2024) que, de no variar, para el año 2050 las emisiones superarán enormemente la cantidad de carbono emitido. Un panorama difícil, apremiado por la necesidad de limitar el aumento medio de temperatura global a 2 grados centígrados o se corre el riesgo de padecer daños ambientales catastróficos e irreversibles.

Frente a esta crisis climática, se exige limitar el uso de estos carburantes o reemplazarlos por energías limpias como la hidráulica, eólica, solar o la obtenida de materia vegetal. A diferencia de las tres iniciales, la fuente que proviene del residuo lignocelulósico, también llamado biomasa, presenta un potencial energético aun poco conocido y desplazado, pero que termina siendo una alternativa eficiente y respetuosa con la biósfera. Por cada punto porcentual renovable añadido al carburante tradicional, se evita emitir 800 000 toneladas de CO₂ a la atmósfera, según explica la Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos (AOP) citada en El País (2023), una ventaja que ya se viene aprovechando en el sector del transporte español, cuya producción de gasolina y diésel contiene por ley un porcentaje de carburante renovable que aspira a llegar al 12 % en 2026.

La biomasa es definida como una fuente de energía heterogénea que abarca la fracción biodegradable de los residuos de origen biológico generados en diversas actividades productivas, tales como la silvicultura, la pesca, la agricultura y la acuicultura, e incluye también los desechos industriales y municipales (Directiva Europea de Energías Renovables, citada en Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDEA], 2024). En otras palabras, se trata de una fuente emergente de bajo contenido de carbono, rica en oxígeno y otros compuestos volátiles, que se utiliza para producir biocombustibles avanzados sostenibles, facilitando así la economía circular, el reciclaje, la conservación de los bosques y la valorización de los residuos de la producción agropecuaria. La biomasa representa más de la mitad de toda la energía renovable que se consume en Europa y ha generado 12.7 millones de empleos a nivel mundial, con un incremento de 700,000 nuevos puestos en un año (International Renewable Energy Agency [Irena], 2022).

Su impacto medioambiental es bastante positivo, pues revaloriza los restos de las actividades productivas no aprovechables para consumo humano, evitando que acaben en vertederos. De esta manera, es posible mantener limpios los suelos forestales, favorecer el desarrollo rural y generar electricidad; en tal sentido, la biomasa es considerada como un factor clave para diversificar el suministro energético, generar riqueza y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero. La Comisión Europea, citada en BBVA (2024) calcula alcanzar un 8 % de consumo de energía totalmente renovable para mediados de siglo, y es que, debido a su adaptabilidad, puede aprovecharse para producir calor, electricidad o combustibles a pequeña o gran escala en plantas de biocombustibles, a partir de diferentes métodos tanto termoquímicos como bioquímicos.

Si bien entre las energías renovables las que mayor impacto han tenido son la solar y la eólica, la diversidad natural ofrece otra distinta, generada a partir de variados tipos de biomasa, además de presentar el mayor crecimiento desde el 2018 con un 30 % de avance (Repsol, s.f.). Se trata de la bioenergía, una de las opciones con mejor proyección para dar solución al problema del

cambio climático y promover la transformación del modelo energético actual, sustituyendo al combustible fósil para dejar una baja huella de carbono. En comparación con el resto de energías alternativas, destaca por su carácter autóctono y por permitir el almacenamiento de la energía solar; ventajas que facilitan su gestión como un factor de equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales, pues reduce la dependencia energética del exterior y se puede adaptar su producción a los picos de demanda.

El desarrollo de la bioenergía en el marco de una economía sostenible no solo desempeña un papel crucial en la preservación del hábitat con la reducción de emisiones de CO₂; sino que, además, impulsa la interacción entre las áreas industriales estratégicas y los diferentes biosectores de la economía, permitiendo aumentar la eficiencia del tejido productivo. Por ello, tanto la Agencia Internacional de Energía (IEA) y el IPCC, consideran a este recurso como un elemento primordial en la preservación de la biodiversidad, pero también resulta relevante en materia de política social, a fin de asegurar el acceso universal a la energía limpia y mejorar la seguridad alimentaria (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2024). Para aprovechar al máximo las bondades que ofrece la bioenergía, será fundamental comprender sus complejidades y desarrollarla a través de un enfoque integrado, el cual requiere:

- Un análisis efectivo de la situación, tomando en cuenta las oportunidades, riesgos, sinergias y compensaciones relacionadas.
- Un entorno político e institucional proclive a diseñar políticas flexibles y sólidas, con medios efectivos para su implementación y que promuevan acciones coherentes.
- Las buenas prácticas de los inversores y productores para minimizar riesgos y maximizar oportunidades.
- Supervisar, evaluar y responder de manera adecuada ante los impactos.

Además, la biomasa se destaca como la única fuente renovable que proporciona combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, utilizados en la generación de calor, electricidad y biocombustibles líquidos para el transporte. Estas características la convierten en un recurso energético atractivo, ya que su desarrollo podría generar importantes oportunidades de empleo y crecimiento económico, impulsando así los sectores agrícolas del país. Por otra parte, la bioenergía ha ganado un notable impulso a nivel mundial en los últimos años, promovida por las iniciativas gubernamentales que promueven su uso. En la Unión Europea, por ejemplo, el 75% de las subvenciones destinadas a energías renovables se asignan a la producción de bioenergía, mientras que el 25% restante se destina a las energías solar y eólica (Cier Galápagos, 2019). Sin embargo, aún es un tema poco conocido para gran parte de la población.

1.2. El proceso de fotosíntesis en la obtención de energías

La creciente demanda de energía a nivel mundial empuja a la búsqueda de nuevas fuentes que sean abundantes, diversas, limpias, inagotables, y que, además, permitan preservar el medioambiente. A medida que avanza el cambio climático, el crecimiento de las energías renovables va consolidándose; en 2022, las energías eólica y solar satisficieron el 80 % de la creciente demanda de electricidad, en tanto, el conjunto de fuentes no convencionales cubrió el 92 % del aumento (Wiatros-Motyka *et al.*, 2023). Adoptarlas es hoy un reclamo social, económico y ambiental con miras hacia un futuro sostenible conectado a una nueva mentalidad, pero también dan pie a la sustitución del actual modelo energético basado en combustibles fósiles insostenible desde todo punto de vista. En ese intento de transición energética, aparece la energía fotosintética como la opción más viable y atractiva.

La energía extraída de la fotosíntesis de las plantas hace posible no solo la reducción de la contaminación ambiental; mediante este proceso ellas expulsan electrones que pueden ser captados por circuitos eléctricos y celdas biológi-

cas implementadas para la generación de electricidad a un coste más asequible, inclusive en zonas con rentas medias o bajas. En 2030, la electricidad obtenida de recursos renovables podría aportar el 65 % del total del suministro de energía eléctrica a escala global; y para el 2050 se podría descarbonizar el 90 % del sector energético (Naciones Unidas, 2022). En tal sentido, producir electricidad a partir de la vegetación sin comprometer la estructura orgánica del entorno natural, marca un hito en el desarrollo evolutivo de la especie y con un futuro promisorio; a pesar de no contar aún con la tecnología requerida para generar cargas de gran potencia eléctrica.

Las hojas de las plantas captan la energía solar y la convierten en energía química estable. Durante este proceso de fotosíntesis, algunas células de organismos autótrofos generan la materia orgánica requerida para el crecimiento normal de las especies verdes; no obstante, el excedente de alimento se dispersa a lo largo de sus raíces donde los microorganismos lo utilizan (Zapien-Rodríguez *et al.*, 2019). Asimismo, expulsan residuos en forma de moléculas de metabolitos más adelante rotas por bacterias para liberar electrones captados mediante electrodos, y así generar electricidad. El tamaño de la planta y su capacidad de producir metabolitos incide directamente en la cifra de electrones desprendidos, por tanto, se trata de un método escalable, aplicable en pequeñas macetas, en los techos de las casas, en jardines urbanos e incluso en parques de grandes dimensiones.

Si bien la fotosíntesis es uno de los procesos más estudiados, guarda aún muchos secretos por develar. Además de cumplir un papel primordial en el proceso de fijación del carbono, causante del calentamiento global, los estudios advirtieron que, en la primera etapa de la fotosíntesis, los organismos a cargo de extraer los electrones desarrollaban un medio de regulación por el cual dejaban escaparse frente a cambios de intensidad de la luz a modo de mecanismo de defensa (Martín, 2023). Esta nueva forma de ver la fotosíntesis permite explicar cómo la mezcla de hidrógeno y oxígeno molecular en una célula de combustible es lo que genera electricidad en las plantas, por ello, su producción

se realiza de manera ininterrumpida, las 24 horas, una ventaja sustancial frente a otras similares cuya duración es limitada, tal cual ocurre con los generadores eólicos sujetos al flujo del viento.

La electricidad obtenida de las reacciones químicas que ocurren en las plantas día y noche, es calificada como una alternativa de energía limpia y sostenible debido a su mecanismo de consumo energético basado en un generador biológico que libera electrones y H₂O sin afectar a los organismos vivos. De acuerdo con las estimaciones de Lecaro-Zambrano & Garzón-Montealegre (2021), esta clase de energía fotosintética podría aprovecharse para uso doméstico, útil encendiendo focos LED, lámparas de 3,5 voltios, calculadoras, relojes digitales, parlantes y para cargar la batería de los teléfonos móviles; siempre y cuando el número de plantas disponibles, especie, su tamaño y cantidad de metabolitos producidos lo hagan posible. Con ese objetivo, la fotosíntesis del tipo carbono 3 sería la más eficaz, ya que la mayoría de las plantas la desarrollan.

La dificultad de suministrar el servicio eléctrico a pueblos muy alejados, obliga a plantear futuras medidas que incluyan energías provenientes de fuentes naturales inagotables, las cuales aseguren una producción sostenible. En ese sentido, aquellos territorios que gocen de grandes hectáreas de bosques y selvas tendrán un mayor acceso a diversidad y cantidad de plantas que les permitan sostener proyectos de energía eléctrica renovables, a la par de procurar no contaminar su ecosistema con el pasar del tiempo. En un contexto donde los grupos empresariales buscan potenciar sus actividades y disminuir costos energéticos, las oportunidades de esta nueva tecnología, abre las puertas a una conciencia ecológica más atenta con el deterioro de la naturaleza, incentivando al poblador al cultivo de plantas en su domicilio y beneficiarse de sus múltiples usos, ya sea en comida o energía.

1.3. Clasificación, características y tipos de biocarburantes

La bioenergía es energía renovable, menos cara y más sostenible, obtenida de la biomasa en un proceso biológico espontáneo o provocado que favorece de forma notable a la mejora y conservación del medioambiente. Se trata de un tipo de producción energética limpia, que comienza con la fotosíntesis de las plantas y el almacenamiento de la energía del sol, convirtiéndose en una fuente no contaminante y competitiva debido a su combustión con un mínimo de emisiones de CO₂; causantes del calentamiento del planeta. Estos derivados de la materia orgánica son los biocarburantes, hoy llamados biocombustibles avanzados, un término que remite a los combustibles de segunda y tercera generación elaborados con residuos y algas respectivamente (Sevillano, 2024), y cuyas aplicaciones son equivalentes a las de sus homólogos fósiles para generar electricidad, calor o movimiento.

Los biocombustibles han existido desde hace mucho tiempo, aunque siempre soslayados por la gasolina y el gasóleo baratos. Al presente, el alza de los precios del petróleo y los esfuerzos mundiales por descarbonizar la economía, han incitado la urgente búsqueda de combustibles limpios y renovables. Al respecto, la segunda generación de carburantes es hoy la más estudiada por su proceso que presenta una huella negativa de CO₂, producidas a partir de residuos lignocelulósicos provenientes de las industrias maderera y agricultura, como aceites usados de cocina, restos agrícolas o ganaderos, biomasa forestal, y más. No obstante, estos remanentes son una fuente biológica infrautilizada e infravalorada, a pesar de sus prometedoras utilidades para reducir emisiones en sectores difíciles de electrificar y porque no suponen cambios disruptivos en su producción ni logística (Antúnez, 2023).

Tabla 1. *Tipos de biocombustibles según la materia prima usada*

Etapas	Definición
Primera generación	Se producen a partir de cultivos agrícolas como el maíz y la caña de azúcar en países como Estados Unidos y Brasil, así como la remolacha azucarera, que es utilizada con frecuencia en Europa. La principal desventaja de estos combustibles es que emplean recursos alimentarios como materia prima, lo que podría poner en riesgo el suministro de alimentos para una gran parte de la población o producir un aumento en los precios de los alimentos. Por ello, su uso se irá restringiendo gradualmente. Ejemplos de estos biocombustibles incluyen aquellos fabricados a partir de aceites vegetales, como el bioetanol y el biodiésel.
Segunda generación	Se originan a partir de residuos lignocelulósicos no aptos para el consumo humano. Su principal componente es la celulosa, junto con otros componentes como la lignina y la hemicelulosa, que se obtienen de desechos provenientes de las industrias agroalimentarias y forestales, la fracción orgánica de residuos urbanos y aceites de cocina reciclados. El aprovechamiento de estos residuos permite la producción de diésel renovable, combustible sostenible para la aviación, biogás y biometano. Para su fabricación, se requiere un pretratamiento que descompone las largas cadenas de polisacáridos en cadenas más simples y cortas, facilitando su hidrólisis enzimática y posterior fermentación.
Tercera generación	Con el fin de abordar las limitaciones de las generaciones anteriores, se propuso utilizar algas y plantas acuáticas con al menos un 50% de aceite natural para la producción de biocombustibles. Las algas, en particular, son una fuente renovable que produce biomasa rápidamente y puede cultivarse en terrenos no aptos para la agricultura. El proceso para obtener energía es similar al de los residuos lignocelulósicos, pero en este caso no se requiere pretratamiento, ya que las algas generan su propia hidrólisis ácida antes de pasar al proceso de fermentación. A pesar de su potencial, la producción de este tipo de biocombustible aún no ha alcanzado una escala comercial.

Nota. Tomado de Cortés-Sánchez *et al.* (2019)

La biomasa vegetal se compone de un 75 % de polisacáridos; sin embargo, la fracción de azúcares usada en la alimentación es ínfima comparada con los polímeros de la parte no comestible de la planta; por tanto, hay un gran extracto de azúcares desperdiciados en la agricultura (Cortés-Sánchez *et al.*, 2019). A efectos de reducir los gases carbónicos, esta materia puede quemarse para obtener biocombustibles que generen electricidad y calor a través de procesos termoquímicos y bioquímicos. Aun cuando es posible utilizar diversas materias energéticas para crear el biocarburante, no todas son sostenibles, generando ya un debate respecto a si el etanol de maíz o caña de azúcar ofrecen beneficios ambientales suficientes como para invertir en procesos de alto consumo de energía para el cultivo, la fabricación de fertilizantes y el procesamiento de plantas (Ecologistas en Acción, 2021).

El impacto de las energías renovables sobre el entorno apenas comienza a percibirse. En un contexto de elevado afán por lograr una transición energética conveniente, se impone un control efectivo de los procesos de combustión de la biomasa para impedir la aparición de sustancias contaminantes vertidas en la naturaleza, además de incentivar tasas realistas de biocombustibles. La primera generación de biocombustibles, calificados por algunos como agrocarburos, tienen una relación directa con la deforestación de zonas tropicales y acaparamiento de tierras, pérdida de la biodiversidad, entre otros. Un ejemplo del problema es el biodiésel en España, en cuya elaboración se incluye un 72,5 % de aceite de palma y que numerosos estudios han demostrado como todo el ciclo de vida de este biocarburante produce más gases de efecto invernadero (Fernández, 2020).

Por tal motivo, los científicos y compañías emergentes están sopesando otros materiales que sirvan para la producción de diversos bioproductos clasificados en sólidos, como son la leña, el carbón vegetal, las briquetas, los *pellets* y restos agroforestales que, mediante la combustión directa, previa gasificación o pirólisis crean electricidad y calor. También están los líquidos, que se componen de aceites pirolíticos, alcoholes y otros obtenidos a partir de plantas herbá-

ceas, oleaginosas, leñosas, residuo agroforestal, y gran cantidad de desperdicio biológico industrial y subproductos del sector alimentario. Por último, los de estado gaseoso, logrados por fermentación anóxica (sin oxígeno) o digestión anaeróbica; un proceso bioquímico microbiano de tres fases que utiliza materia prima rica en humedad y cultivos energéticos a escala piloto como la chopera y la pataca, y el maíz forrajero.

En definitiva, la parte troncal de la apuesta por los biocombustibles se basa en su capacidad para reducir de forma considerable la emisión de CO₂. Si bien hay diversas maneras de fabricar combustible renovable, comúnmente se realizan a través de reacciones químicas, fermentación y calor, lo que permite descomponer los azúcares, almidones y otras moléculas de las plantas; lo extraído se termina de refinar para fabricar productos que puedan utilizar autos y otros vehículos. El bioetanol es el más usado en el transporte, creado por fermentación de los azúcares del maíz, el trigo y la caña de azúcar en grandes cantidades como líquido; resulta fácil de producir. Debido a que contiene oxígeno, este ayuda a quemar combustible de forma más eficiente en el motor del coche, reduciendo la contaminación del aire. Entre los mayores productores de este producto están Estados Unidos seguido de Brasil.

Como alternativa del gasóleo está el biodiésel, que deriva de grasas como el aceite de colza, plantas o aceite reciclado de cocina, es un líquido disponible en altos porcentajes, y puede mezclarse con el diésel del petróleo, aunque tiende a ser afectado por el frío en su estado puro. Comparado con el estándar, se disminuye el CO₂ hasta en un 66 % (Scania Group, 2022). El biogás, compuesto por la misma molécula del gas natural, es un combustible que usa materia orgánica en descomposición capturada de las aguas residuales, los vertederos, explotaciones ganaderas y otras fuentes. Una vez captado, debe refinarse para eliminar el agua, el dióxido de carbono y otros elementos, de manera que se pueda alimentar los vehículos de gas natural. Aunque se puede aplicar en el área del transporte, también tiene el potencial para la generación de calor y electricidad.

Otros biocarburantes comunes en el mercado son el biobutanol, producido a partir de la fermentación acetona-butanol-etanol, que tiene la capacidad de mezclarse poco con el agua, limitada evaporación, mínima corrosión y mayor acción calorífica. De otro lado, sustituye a la gasolina y no requiere modificar el motor. Asimismo, está el biocombustible M4, un nuevo compuesto elaborado con 87 % de etanol y 13 % de una fórmula secreta; usado también en motores de gasolina sin transformarlos. Finalmente, se han producido otros tipos de combustible de origen vegetal que son utilizados tanto en la aviación como en el transporte marítimo; han sido más de 150 000 vuelos utilizando dicho producto, sin embargo, su adopción está aún a niveles inferiores. Según National Geographic (2022), la cantidad de biocarburante en aviación producida en 2018 representó menos del 0,1 % del consumo total.

1.4. Procesos generadores de biomasa en energía

Desde el descubrimiento del fuego hace más de 700,000 años, la biomasa ha sido la fuente de energía más relacionada con los inicios de la humanidad, utilizándose de manera continua para facilitar cambios y garantizar el desarrollo de las comunidades. En la actualidad, con un enfoque en la sostenibilidad de un planeta en riesgo, este recurso ha cobrado tanta importancia que se posiciona en el cuarto lugar, detrás del carbón, el petróleo y el gas natural. Al respecto, según el estudio realizado por De Gregorio (2020), la biomasa representa actualmente un 10% del suministro de energía primaria en los países en desarrollo y un 6% entre los miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Este recurso se ha convertido en una alternativa ecológica, compuesta por residuos orgánicos de origen animal o vegetal, en contraste con los combustibles fósiles.

Las principales categorías de la materia orgánica son la biomasa forestal o residuos de la explotación y mantenimiento de bosques; la agrícola, confor-

mada por los remanentes de cultivos y subproductos del campo alimentario; los residuos orgánicos provenientes del estiércol, lodo de depuradoras y restos de comida; y los cultivos energéticos, entre ellos el miscanthus y el cardo. Sin embargo, la sustancia base para generar biomasa es la madera y sus derivados, en especial los pellets o pequeños cilindros compactados fabricados también de plástico reciclado, muy presentes en el contexto español para uso doméstico (91,3 %) e industrial (8,3 %), precisa la Asociación Española de la Biomasa (2023). Aun así, estos podrían contribuir en la deforestación de bosques o fragmentarse en microplásticos para llegar al mar como desechos, afectando la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos.

En los países con alta dependencia energética, la biomasa emerge como alternativa idónea en procesos de cogeneración de energía eléctrica y térmica. Por lo general, se emplea para generar calor mediante calderas de calefacción y calentar agua en las viviendas mediante un funcionamiento sencillo y fiable. En estos aparatos, el material reciclado se quema con lentitud y sus cenizas sirven como abono agrícola, completando un círculo de rentabilidad económica a medio y largo plazo. En paralelo, el ámbito industrial ha sabido aprovecharlo en su labor de producción usando la biomasa en secaderos, generadores de aire caliente y frío, hornos, climatizadores, equipos de frío y secaderos; maquinaria nueva que son factor clave para descarbonizar el entorno hasta en un 95 % y reducir más de 30 % en el consumo anual de biocombustible usando biomasa seca en lugar de la húmeda (BBVA, 2024).

Tabla 2. *Formas de transformación de la biomasa*

Métodos termoquímicos	Para combustionar la biomasa se utilizan materiales de baja humedad como maderas, cáscaras o paja; estas se convierten en gases calientes que producen calor y generar electricidad. Otro método es la pirólisis, que descompone la biomasa con calor sin oxígeno para obtener gases formados por residuos sólidos carbonosos, líquidos hidrocarbonatos, hidrógeno y óxidos de carbono e hidrocarburos. La gasificación y la cocombustión también llevan a cabo la combustión de carbón en las calderas, reduciendo el consumo de carbón y de emisiones de CO ₂ .
Métodos bioquímicos	Se utilizan microorganismos que degradan las moléculas de biomasa con un alto contenido en humedad. Entre ellos están la fermentación alcohólica de hidratos de carbono de las plantas para elaborar etanol para la industria; y la fermentación metánica o digestión sin oxígeno de la biomasa para descomponerla y crear el biogás.

Nota. Tomado de Miño (2022)

Este recurso orgánico puede usarse tanto en calderas individuales como para alimentar de electricidad en fábricas e incluso en una ciudad. La conversión a gran escala da inicio en plantas industriales mediante procesos termoquímicos y biológicos que producen la combustión; esta libera grandes cantidades de calor para transformar en vapor el agua que circula por las tuberías y acumularlo en una turbina junto al generador de energía eléctrica, haciendo girar sus palas. Esta fuerza mecánica termina por convertirse en energía eléctrica que pasa luego a un transformador donde se amplifica su voltaje, para finalmente canalizar hacia la red eléctrica convencional rumbo a las casas (Endesa, 2021). El vapor proveniente de la turbina vuelve a transformarse en agua líquida dentro del condensador y desde aquí se envía al tanque de alimentación para reiniciar el proceso de producción de vapor.

La producción eléctrica de la biomasa en fábricas no difiere al de fuentes como el carbón o la energía solar térmica, sin embargo, el resultante es un

insumo complejo, que se genera en todo momento, al contrario de otras potencias renovables sujetas a la presencia del sol o el viento. Estos centros son muy eficientes medioambientalmente, el CO₂ liberado a la atmósfera durante la combustión es anteriormente captado por las plantas durante su etapa de crecimiento, por lo tanto, este gas no aumenta en el aire y el balance final tiende a ser neutral. Actualmente, Naciones Unidas estima un promedio de 1700 plantas de biomasa operativas en todo el mundo como respuesta a una enorme producción anual de residuos, la cual superaría los 2000 millones de toneladas, con una proyección superior a los 3400 millones en las próximas tres décadas (Coral Group, 2024).

La biomasa es un recurso energético mayoritario en distintos países emergentes de África, América y Asia; sitios donde las centrales de biomasa tienen un rol clave en el desarrollo y la economía rural. Y es que estas instalaciones generan empleo en las zonas forestales y agrícolas donde se ubican, desde la recolección y transporte del material orgánico hasta la operación y mantenimiento de las sedes; por lo mismo, benefician a regiones que sufren un fuerte éxodo de la población. Sin embargo, a nivel técnico podría representar una seria desventaja cuando la biomasa, dependiendo de su origen, podría necesitar unos procesos de transformación más complejos que, si bien algunos territorios tienen los recursos para efectuar cambios en su industria, otros estados no disponen de una tecnología puntera, la cual les permita afrontar el tratamiento de esta prometedora fuente de energía.

1.5. Beneficios de los biocombustibles como fuente de energía renovable

Recurrir a fuentes de energía alternativas que reduzcan el impacto sobre el ecosistema es una prioridad más que urgente. Hoy en día, los combustibles fósiles representan el 80 % de la demanda energética mundial, pero son también responsables del 89 % de la emisión de gases nocivos, causa central del calentamiento global. De acuerdo con las estimaciones hechas sobre las ac-

tuales reservas de combustibles no renovables al 2020, se podría contar con el petróleo por 57 años, reservas de gas por 49 años, y el carbón estaría presente por 139 años aproximadamente (Kuo, 2019). Entre otros elementos, la biomasa ha resurgido como una auspiciosa alternativa por su alto valor local y distribución, se trata entonces de una tecnología muy gestionable, que puede generarse y consumir a partir de compuestos renovables propios y su almacenaje no es nada complicado.

Es importante conocer la manera cómo se maneja el potencial energético de la biomasa y las oportunidades que tiene frente a los combustibles fósiles. Para generar electricidad, el insumo se quema en una caldera y termina transformado en un vapor que mueve la turbina conectada a un generador de energía. Es decir, el proceso provoca emisiones asociadas a gases de efecto invernadero y micropartículas de riesgo moderado debido a su dispersión controlada de manera descentralizada y reducida; ahora bien, enfatiza Morales (2022), de concentrarse los contaminantes gaseosos en un núcleo urbano, supondría un serio peligro de salud pública. Es claro que la biomasa cumple un papel trascendental en zonas rurales ricas de este compuesto, pero exige llevar un monitoreo efectivo del origen, la promoción, la quema e informar con precisión para asegurar una transición energética adecuada.

Estos mecanismos para elaborar calor y energía, suelen realizarse en instalaciones de gran tamaño, industriales y de gran centralización, con el objetivo de rebajar el coste energético y tener un mayor alcance. Aun así, su producción no exige mayores modificaciones en la parte técnica, de hecho, existen tecnologías maduras disponibles para procesar la biomasa e incluso es viable adaptar la infraestructura actual. Aprovechar los restos biodegradables agrícolas y ganaderos mediante las plantas de biogás es un proyecto de amplio interés en Europa. Desde finales del 2020, la Unión Europea dispone ya de casi 19 000 centrales y más de 11 000 de ellas están en Alemania, le siguen Italia y Francia con más de 1600 y 700 respectivamente, y España tiene 300 (Cordero, 2023);

cuya operatividad varía según la tecnología usada, el tipo de biomasa, la potencia instalada y el lugar de instalación.

Son las propias compañías las más interesadas en apostar por las oportunidades que brinda este nuevo combustible para el sector, muy por encima del convencional como el petróleo o el carbón. En España, por ejemplo, el gas fósil que se importa desde Argelia tiene una riqueza en metano del 97 %, bastante alta en comparación con el generado en las plantas locales de biogás cuyo rango oscila entre el 55 % y el 60 % y el resto lo compone el CO₂ casi completamente, aunque es posible filtrar hasta lograr un sorprendente 97 % (Pichel, 2019). Estas ventajas se deben justamente a los sedimentos orgánicos de origen, los cuales sintetizan el dióxido de carbono que se desprende de los biocombustibles reduciendo las emisiones de carbono y de azufre. Ello los convierte en una opción bastante eficiente y al provenir de materia prima inagotable se vuelven altamente rentables.

En cuanto a su rendimiento, los biocombustibles son análogos químicamente a sus pares fósiles; de hecho, es difícil distinguirlos molecularmente. Ello hace factible aplicarlos en los vehículos totalmente o de manera parcial, sin necesidad de grandes transformaciones en los motores de transporte terrestre principalmente, puesto que su uso en las industrias, la aviación o el sector marítimo está muy extendido. Además, no requieren de sitios para almacenamiento ni infraestructuras de distribución complejas, cuestiones que ayudan a reducir enormemente los gastos en logística y dar comienzo a una tan esperada conversión energética. Asimismo, al surgir como una opción energética a las tradicionales, posibilita promover una economía circular que aprovecha los desperdicios para otorgarles un nuevo uso antes de que acaben en los vertederos y colapsen el medioambiente.

Por otro lado, el combustible renovable surge como una nueva opción que diversifica las fuentes energéticas disponibles e incrementa la seguridad del suministro. Ello contribuye a que las naciones sujetas a los vaivenes del mercado internacional tengan la oportunidad de independizarse y ser dueños de

su propia transformación económica (Naciones Unidas, 2024). De esta manera, los Gobiernos podrían establecer un comercio menos volátil y con mayor estabilidad de precios, abriendo la posibilidad de ofrecer al ciudadano un servicio de energía más barato. Sin embargo, aunque el planeta cuenta con el potencial energético, sería imposible aprovecharlo por completo para cubrir la enorme demanda de energía. Implementar la explotación de los recursos a gran escala, exigiría al máximo la capacidad de regeneración de la tierra hasta conducirla al colapso.

Por el contrario, se pone en tela de juicio a los biocombustibles hechos a base de caña de azúcar, maíz, soja y aceite de palma, productos destinados al sector industrial cuando bien podrían satisfacer la necesidad nutricional en territorios con altos índices de hambre. De acuerdo con la FAO (2024), la carencia de comida afectó el estado de salud de entre 691 a 783 millones de personas durante el 2022; en paralelo, la transformación de los cultivos en combustibles en contextos de hambruna resulta poco sensato, además de desestabilizar el mercado con precios elevados de alimentos y en consecuencia brechas de desigualdad. Por tal motivo, se buscan nuevas alternativas para generar biocombustibles a partir de los restos lignocelulósicos derivados de la agricultura y el sector forestal, contribuyendo con la recolección de residuos que de otra forma contaminarían el ambiente.

1.6. Impacto económico, social y ambiental de los biocarburantes

A raíz del cambio climático y la creciente preocupación por las emisiones de carbono, los gobiernos del mundo asumen el desafío de hallar soluciones energéticas más sostenibles, en un momento crucial para asegurar el futuro de la humanidad. Con ese fin, han emergido los biocombustibles como una prometedora alternativa en el abastecimiento de energía y la reducción de gases tóxicos. Aunque su origen es biológico, los carburantes renovables de primera generación captan la atención por sus severos impactos ambientales y sociales

asociados con la deforestación y pérdida de biodiversidad, especialmente en las zonas de Sudamérica. A pesar del daño, pareciera no existir la voluntad de aminorar la importación de la planta de soja a Europa para preparar el biocombustible, actividad que se multiplicó por cinco desde el 2015 hasta el 2022 (Transport & Environment, 2023).

La exacerbada deforestación del Amazonas se disparó en el 2021, debido a la conversión de la naturaleza en tierras de cultivo industrial, para el pastoreo de ganado y la agricultura. Esta tendencia siguió en curso hacia el 2022, con picos entre enero y agosto, el porcentaje de destrucción más alto que en cualquier otro momento después de 2008, propiciando la liberación de carbono irrecuperable y la pérdida de biodiversidad (Marahrens, 2022). Con selvas tropicales moribundas, es imposible mantener el rango de 1,5°C exigido y que evita superar puntos de inflexión climáticos. Entre otros factores, de seguir el mismo ritmo se compromete la estructura del bioma seriamente, y al menos el 10 % de la Amazonía se encuentra en peligro de convertirse en un ecosistema más degradado y seco para el 2050, mientras que el 47 % tiene un riesgo de transición moderado (Wenzel, 2024).

Bajo los cánones actuales, cubrir la demanda de biocombustibles requiere contar con una producción a gran escala de maíz y soja principalmente. Y es que, a pesar de disponer de una amplia gama de combustible alternativo, actualmente la soja es la materia prima base para el 26 % del biodiésel que se consume en el mundo, además del bioetanol proveniente de la fermentación alcohólica de azúcares de plantas como la caña de azúcar, la remolacha o algunos cereales ricos en carbohidratos, entre ellos el maíz (Villadiego & Castro, 2020). La necesidad de lograr un alto rendimiento en el cultivo de estos granos, obliga a impulsar la implantación del monocultivo industrial, lo cual conllevaría a secuelas ambientales muy severas; el cultivo de maíz sin ningún tipo de control, por ejemplo, conduce a una erosión del suelo mayor a la de cualquier otro producto agrícola utilizado.

La solución de bioproductos para descarbonizar el medio ambiente podría traer problemas de no tomar medidas responsables. En Europa se transforman diez mil toneladas de trigo, el equivalente a quince millones de barras de pan, en etanol para autos; además, el 50 % del aceite de palma, culpable del 40 % de la deforestación de Borneo, y el 32 % de soja se destinan al sector transporte, más otras especies, se cultivan en tierras de 9,6 Mha, una superficie mayor que la isla de Irlanda (Fehrenbach *et al.*, 2023). Igualmente, los Estados Unidos flexibilizaron medidas para ampliar la oferta de gasolina con etanol de maíz, una norma que fomentará la explotación de su siembra; mientras, en Argentina, ante la escasez del diésel, se dispuso elevar el contenido de biocombustibles hasta el 7,5 % en un contexto de aumento de precios de los alimentos (Gobierno de Argentina, 2022).

Continuar tensando la demanda mediante la promoción de los biocombustibles resulta desatinado en un mundo donde 828 millones de personas padecen de hambre (Organización Mundial de la Salud, 2022). Los cambios indirectos en el uso de la tierra por causa de cultivos predominantes, también suscitaron la falta de rotación de cultivos, aumentando la vulnerabilidad a males y plagas, tal cual ocurrió en los años 70 cuando un hongo foliar infectó los maíces híbridos de alto rendimiento con pérdidas voluminosas para los agricultores. Así pues, la fragilidad de los sembradíos se incrementa con climas de tendencia tan volátil, sumada a una dependencia mayor del uso de pesticidas. De otro lado, el acaparamiento de tierras puede desencadenar conflictos con las comunidades locales o pueblos indígenas en países donde se concentran los más altos porcentajes de la biodiversidad del planeta.

La percepción de cómo los biocombustibles afectan la disponibilidad de alimentos, es un tema sensible, objeto de extensos debates por años. Aunque la especialización de cultivos origina un efecto ondulatorio en toda la cadena alimentaria y, en consecuencia, aumenta la inseguridad alimentaria, las regulaciones deben orientarse a promover la utilización de compuestos orgánicos

resultantes o subproductos de la actividad agropecuaria. Con esta materia prima, será posible desestimar la adaptación de nuevos terrenos para plantaciones destinadas exclusivamente a la preparación de biocombustibles. Igualmente, será crucial sopesar el beneficio neto entre la demanda energética intensa del mercado y las exigencias de potencia masiva presentes en el proceso de producción del combustible alternativo, el cual incluye la extracción, transformación y refinado de los restos orgánicos.

CAPÍTULO II

RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

La contaminación por residuos sólidos es un problema crítico en todo el planeta, causado por un modelo socioeconómico basado en la explotación de recursos y la generación de bienes, y en la forma como los seres humanos se vinculan con la naturaleza. Y es que la evolución de las actividades industriales, y una desordenada expansión de las ciudades ha provocado un flujo adicional de residuos que sobrecarga la capacidad de los procesos de reciclaje natural. Por tal razón, la gestión de la basura urbana se ha convertido en un asunto prioritario dentro de las políticas públicas que buscan implementar un sistema efectivo en los procesos de recolección, transporte, selección, acopio y disposición final de los residuos para su posterior aprovechamiento en la elaboración de compost, reciclaje de materiales o la producción de combustibles ecológicos.

Sin embargo, cuando este trabajo de valoración de los residuos no es posible, se recurren a los rellenos sanitarios o la incineración como medidas alternativas, las cuales no solo terminan siendo insuficientes, sino que tienden a agravar la problemática. Por tal motivo, se considera que un manejo integral de los residuos es la solución para lograr un equilibrio entre un ambiente sano y actividades sostenibles. Para ello, será crucial conocer la tipología y composición de los restos para identificarlos y sacar provecho de su potencial energético con el fin de disminuir los impactos negativos al hábitat. En paralelo, resulta conveniente comprender el comportamiento social y los hábitos de consumo del ciudadano para crear planes de gestión integral de residuos ligados a la

producción, manejo y disposición final de la basura acumulada en pos de una mejor ciudad con altos niveles de calidad de vida.

2.1. Definición de los residuos urbanos

Discutir sobre la fragilidad del medioambiente se ha convertido en una obligación y parte neurálgica de un desarrollo sostenible y el crecimiento económico. La preocupación por un mundo con mayores y mejores oportunidades para las generaciones futuras, se resume en los objetivos globales de la Agenda 2030 de la ONU y su plan de acción para cambiar la sociedad global. Entre varias de sus estrategias, se orienta la forma como el ser humano interactúa con el entorno; y es que la compleja relación entre comunidad y naturaleza ha generado diferentes enfoques comunes respecto al problema del agua, cielo y aire; y es la gestión de desechos sólidos puntualmente, un problema universal cuyos números indican que existe un 90 % de desperdicios vertidos o quemados a cielo abierto en los países de ingreso bajo, afectando seriamente la salud de los más pobres (Daly & Cognuck, 2021).

En toda actividad humana, se eliminan remanentes que no les agregan valor a los procesos o terminan de cumplir con su propósito inicial. Durante su ciclo biológico, los seres vivos generan material orgánico a diario, absorben las materias primas y excretan desechos; es decir, cualquier organismo devuelve las sustancias que lo componen al entorno. También conocidos como basura, los residuos sólidos urbanos (RSU) proceden de los hogares o la vía pública, incluyendo comercios y servicios públicos; la mayor parte clasificados como no peligrosos. Sin embargo, con el aumento de la demanda en los mercados y el continuo avance industrial y del flujo económico, se viene produciendo una fracción adicional de residuos acumulados que tardan en degradarse, provocando sobrecargas en la capacidad de los procesos de reciclaje natural (Carvajal-Romero *et al.*, 2022).

Los residuos sólidos urbanos se constituyen en un grave problema contemporáneo difícil de afrontar. Los números que arrojan la investigación de Martínez *et al.* (2022), muestran una generación de entre siete y diez mil millones de toneladas de residuos mundiales, de los cuales, entre 300 y 500 millones presentan una alta peligrosidad de contaminación y accidentes. En este mismo estudio, se identifican a 28 países con riesgo de congestión de residuos, colocando a México, India y Uzbekistán como grandes importadores de material tóxico; mientras que la basura en China, Mozambique, Senegal y Afganistán los convierte en territorios con mayor contaminación química. Igualmente, en la lista aparecen cuatro países europeos, Ucrania, Bosnia, Bélgica y Bulgaria, con riesgo medio de padecer daños al medio ambiente y la salud de sus ciudadanos debido a sus desechos.

En ciudades importantes como Madrid o Barcelona, por ejemplo, se genera una cantidad diaria de un kilogramo por habitante. Mientras, América Latina y el Caribe afrontan este problema a través de un sistema de recojo limitado y poco articulado que, si bien alcanza un 85 % de eficacia, se reporta tan solo un 4,5 % en las tareas de reciclaje de basura para la región (Volta, 2020). A pesar del poco interés de los gobiernos para impulsar la correcta gestión de la basura y promover la toma de consciencia entre su población, son Uruguay y Colombia los que mejor solucionan esta problemática, consiguiendo una cobertura del 95 % de recolección en sus urbes más importantes, a diferencia de Estados como México, Chile, Argentina, República Dominicana y Brasil, que lideran el *ranking* en la producción de residuos al superar el kilogramo por día (Kaza *et al.*, 2018).

La situación en Perú no es muy diferente, ya que cada año se producen más de siete millones de toneladas de residuos sólidos (Defensoría del Pueblo, 2019), principalmente debido al aumento en las tasas de industrialización y urbanización, lo que ha impactado negativamente tanto en el medio ambiente como en la salud de la población. Según los datos del Sistema de Información de Gestión de Residuos Sólidos (Sigersol, 2021), la generación de residuos sólidos

lidos domésticos per cápita fue de 0.58 kg por habitante al día, y el promedio municipal alcanzó los 0.83 kg por habitante al día, lo que suma ocho millones 214,355.90 toneladas, es decir, 22,505.08 toneladas diarias. En el mismo informe, se detalla que del acumulado un 56.70 % fueron residuos orgánicos, 20.94 % inorgánicos, 12.66 % no aprovechables, y un 9.71 % se catalogaron como remanentes peligrosos.

De otro lado, la mala gestión de los correctos abrió las puertas, desde hace muchos años, a la exportación y tráfico de residuos plásticos. Este fenómeno internacional, involucra a Estados Unidos y su envío de cuantiosos volúmenes de este material sintético a países del área, alcanzando su mayor pico de entregas a Latinoamérica en el año 2021, a raíz de la negativa del Gobierno chino de aceptar este tipo de remanentes. Al respecto, la plataforma ambientalista Gaia (2021) alertó que durante los primeros ocho meses del 2020 llegaron 44.173 toneladas de residuos plásticos desde Estados Unidos a quince países de América Latina, siendo México su destino central, configurando un serio peligro de contaminación de la naturaleza y la vulneración de los derechos de las poblaciones receptoras a disfrutar de un ambiente seguro y apto para su salud.

2.2. Clasificación de los desechos sólidos domésticos

La gestión eficaz y oportuna de los desechos sólidos debe ser una tarea que comprometa a todas las personas e instituciones de este planeta. La falta de conciencia sobre los efectos que genera la descomposición y mezcla de los residuos termina contaminando aire, agua y tierra. Para dar inicio a la recuperación del ecosistema, será fundamental promover un consumo responsable y la reutilización de los desechos apostando por una red de reciclaje planificada y articulada con iniciativas que aprovechen los descartes de las industrias. Sin embargo, para lograr un proceso integral y ordenado en el tratamiento de los desperdicios, será relevante saber identificarlos a partir de su tipología y composición (Moreno, *et al.*, 2021); de esta manera es posible separar aquellos

materiales susceptibles al reciclaje para reducir los costos de producción y la cantidad de residuos que se arrojan.

Por lo general, la clasificación de los residuos sólidos parte de su procedencia, bien sean domésticos, comerciales, industriales, sanitarios, de mercados y otros. No obstante, existe una multiplicidad de categorías que varían de acuerdo con las políticas de los países o la definición ofrecida por los organismos internacionales especializados; las más comunes son acorde a su biodegradabilidad, origen y composición. Así pues, los restos inorgánicos como papeles, vidrios, latas, cartón, tetrabrik y algunos tipos de plástico tardan años en descomponerse, pero se pueden aprovechar y reciclarlos, mientras, los residuos orgánicos se conforman de maleza, *grass* y podas, sobras de fruta, verduras, hortalizas, cáscaras y otros, además de flores, hojas y tallos. Actualmente, en el Perú se generan un 21 % de la primera definición y otro 56 % que representa al siguiente grupo (Diario Oficial El Peruano, 2023).

La Organización Panamericana de la Salud (OPS), citada en Jumique (2023), indica que el 50 % del excedente proveniente de las ciudades no se somete a un adecuado tratamiento final, sumado a un sistema de recolección poco útil y en algunos casos hasta inoperantes cuando se trata de las periferias marginales. Por tanto, los especialistas son proclives a la adopción de hábitos sostenibles y la promoción de estrategias de reciclaje que faciliten la correcta comprensión sobre cómo separar y agrupar los residuos. Mediante una adecuada clasificación de los desechos, se generan beneficios significativos a favor del ecosistema; al darle un nuevo uso a los residuos, se les resta carga a los recursos naturales, reduciendo su extracción y explotación en la industria, además se promueve la mejora e inclusión de los rellenos sanitarios en los procesos municipales para descontaminar el paisaje.

Tabla 3. *Clasificación de residuos sólidos por colores*

Tipos de residuo	Color
Vidrio	Plomo
Metal	Amarillo
Papel y cartón	Azul
Plástico	Blanco
Peligrosos	Rojo
Orgánicos	Marrón
Generales	Negro

Nota. Tomado de Consejo Directivo Nacional (2024)

A través de un gestor de datos, que revela información sobre residuos sólidos en el mundo entero, se reveló que en más de mil 800 ciudades de 164 países la generación de desechos llega hasta 1,900 millones de toneladas por año, de las cuales solo el 19 % termina siendo reciclada y un 70 % es procesada en rellenos sanitarios y espacios a cielo abierto (Grasso, 2023), cuya disposición indiscriminada los convierten en focos de infección. Pero, en esta medición, distintas voces sostienen que la línea que demarca las grandes diferencias entre los países contaminantes sería su nivel de desarrollo económico; es decir, una condición económica saludable estimula un mayor consumo y con ello crece el volumen de basura. Así pues, aunque solo el 16 % de la población mundial lo representan los países de mayor ingreso, estos generan más del 34 % del desecho global (Banco Mundial, 2018).

Por último, los actores implicados en el problema mundial de los residuos deben enfrentar una serie de mitos insertados en el imaginario de la persona como son la idea de quemar la basura o pensar que el reciclaje de un artículo no es cíclico. De hecho, muchos de ellos se pueden transformar una y otra vez sin perder sus propiedades, ahí están los metales y el vidrio que han demostrado gran eficacia para convertirse en productos nuevos de forma indefinida, pero sobre todo destaca el aluminio de las latas, un material de

gran demanda por su frecuente reutilización. En tanto, el papel de impresión virgen puede reciclarse de cinco a siete veces hasta degradarse y ser procesado como papel menor para encartes de envases o cajas de cartón. Igualmente, el plástico se recicla hasta dos veces en otro similar o algún artículo liviano para el hogar, e incluso nuevos usos como maderas plásticas.

2.3. Residuos sólidos urbanos y su impacto medioambiental

Los residuos sólidos son tan antiguos como la humanidad; las comunidades en su continua interacción con el ambiente han visto la necesidad de transformarla según sus intereses a sabiendas de habitar en un mundo aparentemente indestructible. Hoy, las imágenes de un planeta con océanos de plástico, bosques convertidos en desiertos y especies animales y plantas que desaparecen a un ritmo antes impensable configuran un problema que, según los especialistas, de no detenerse se habrán extinguido el 67 % de la fauna en peligro de extinción en un lapso de 100 años (Greenwald *et al.*, 2019). A medida que el ser humano se asentó en grupos y construyó grandes metrópolis que los cobijaran, sus actividades y demandas rutinarias agudizaron la acumulación de desechos; permitiendo la aparición de plagas capaces de transmitir una serie de enfermedades.

El desmesurado aumento en el volumen de la basura representa un fenómeno mundial de la sociedad contemporánea, el cual exige soluciones especializadas con planes integrales para su control efectivo (Quispe, 2020). No obstante, la población y el consumo per cápita siguen creciendo junto con sus desperdicios; complicando cada vez más su buen manejo debido al poco espacio que, en muchos casos, terminan siendo improvisados en detrimento de su tratamiento. Mientras, casi nada puede hacer la gestión municipal cuando sus tareas de recolección dependen de una inversión pública corta, en especial para los contextos de gran pobreza. Sumado a lo anterior, existe un desinterés ciudadano de adoptar estilos de consumo responsables y preferir dejar el problema

en manos de la administración pública, actitud que pone en riesgo la capacidad del ecosistema para resistir el desarrollo humano.

En definitiva, los residuos sólidos urbanos vienen impactando de forma negativa en todo el entorno, desde las áreas urbanas, rurales y las zonas industrializadas, convirtiéndose en una seria amenaza para la sostenibilidad y sustentabilidad ambiental. La incineración de basura, por ejemplo, práctica muy común en barrios latinoamericanos puede liberar gases tóxicos con partículas dañinas que al ser inhaladas pueden provocar males respiratorios, desde reacciones alérgicas hasta cuadros de obstrucción pulmonar y el cáncer de pulmón cuando existe una quema sin poner atención al contenido del desecho (Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social de Paraguay, 2024). En consecuencia, la contaminación en el aire que deriva de la basura afecta tanto a personas enfermas como sanas, siendo el grupo más vulnerable los niños, las embarazadas y quienes sufren afecciones cardiovasculares.

De otro lado, las cifras respecto a la acumulación de basura en los ecosistemas acuáticos han despertado una enorme preocupación social que detonó entre el 2000 y 2019, tiempo en el cual se alcanzó los 353 millones de toneladas de residuos plásticos provenientes de envases (40 %), bienes de consumo (12 %), prendas de vestir y textiles (11 %.), indicados en un estudio de La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (2022). En el balance de los daños, la filtración de este tipo de materiales en los ríos y mares fue de más de 140 millones de toneladas, de las cuales 109 millones de toneladas terminan en ríos y lagos, sumados a 30 millones acumulados en océanos, y aproximadamente unos 1,4 millones viajan desde los ríos a los mares (Planelles, 2022). Tales métricas alertan de serias amenazas a la supervivencia de las especies marinas y la calidad del agua.

La contaminación del suelo es otra consecuencia importante. Disponer sobre él los restos sólidos durante años ha generado que los lixiviados de diferentes elementos como grasas, aceites, metales pesados, ácidos entre otros, se filtren en su estructura y comprometan sus propiedades físicas y químicas, eli-

minando la microfauna de hongos, lombrices, musgos, y bacterias que lo componen, necesarias para mantener la fertilidad de las tierras. Tamaña alteración reduce además su capacidad de aireación, retención de agua y la porosidad, lo cual evita la recuperación de la flora y acelera el proceso de desertificación. En un estudio de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2021), se advierte sobre el alcance global de este problema, al punto de que hoy es posible hallar contaminantes en los suelos de cualquier continente, inclusive en regiones muy alejadas.

2.4. El rol municipal en la gestión de RSU

Una de las causas del calentamiento global es la mala gestión de los residuos, un problema presente desde la etapa preindustrial, aunque fue recién a mediados del siglo XX cuando las instituciones reconocieron que la basura generada afectaba gravemente al ecosistema (Ferrão & Moraes, 2021). En los últimos años, el volumen acumulado de desechos se ha exacerbado potencialmente debido no solo al crecimiento poblacional y las migraciones desde zonas rurales; agudizan la situación una seguidilla de restricciones financieras y de gestión de los recursos junto con cambios imprevistos en las tendencias de consumo y los estilos de vida de las personas (Ayeleru *et al.*, 2021). De ahí la importancia de establecer una política de gestión de residuos con un enfoque multidimensional que aborde y diseñe cada una de las etapas previstas de manera holística y sistémica.

La planificación y ejecución de estrategias recae primordialmente en las municipalidades; al ser estas las gestoras intrínsecas de los asuntos locales detentan las competencias para emprender un diagnóstico situacional en cada una de las zonas de su jurisdicción a fin de proponer alternativas de solución y desarrollo. Es decir, sus funciones no deben limitarse únicamente a la eliminación de los desperdicios; implica además fomentar la adopción de prácticas sostenibles como son la recuperación y el reciclado de residuos que minimicen

el deterioro del entorno (Bartra & Delgado, 2020). Asimismo, será importante aprovechar la atención de ciertos gobiernos a la gestión de residuos, los cuales procuran asistir a las autoridades locales en su trabajo de implementar programas ambientales orientados a la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de la basura.

Sin embargo, la efectividad de estas medidas está estrechamente ligada a la disponibilidad de instrumentos técnicos que aporten con mejoras a un servicio de limpieza pública viable y sostenible. Frente a este gran reto, resulta imprescindible que funcionarios municipales, consultores y profesionales inmersos en la materia, reciban capacitaciones para sustentar proyectos ajustados a las problemáticas locales. En ese sentido, las municipalidades están directamente afectadas por el presupuesto público y su capacidad financiera (Huamaní *et al.*, 2020) para asumir decisiones respecto a la identificación, formulación y el análisis de proyectos de servicio de limpieza pública con una visión de inclusión social e integradora. Igualmente, toda gestión de residuos debe sustentarse en el desarrollo del fortalecimiento institucional, educación ambiental y sanitaria, y dirección técnico-operativa.

Actualmente, muchos de los lineamientos políticos y planes dirigidos al mantenimiento del ambiente priorizan la valorización como procedimiento obligatorio para implementar tecnologías e infraestructuras que faciliten el tratamiento de los residuos urbanos, además del acondicionamiento de áreas especializadas para una disposición controlada. Asignar recursos públicos de manera efectiva, se convierte en una demanda social que solicita la intervención de las municipalidades no solo en la conservación de los espacios naturales, sino también en la recuperación de hábitats abandonados o afectados por una ineficiente gestión de sus residuos acumulados. Bajo esa premisa, será posible aplicar programas que contribuyan a la protección de especies locales y fortalecer la resiliencia de ecosistemas dentro de las ciudades (Requejo-La Torre *et al.*, 2021).

Figura 7. *Etapas de un sistema de gestión integral de residuos sólidos municipales*

Un enfoque holístico en el tratamiento de la basura debe beneficiar a todos los actores de la comunidad. En comparación con los esfuerzos de otras latitudes, el sector informal que opera en América Latina, como son los recicladores, aparece como un activo crucial en la cadena de recolección de residuos. Según los reportes de ONU Habitat (2024), más de 200 ciudades vieron crecer su tasa de reciclaje hasta el 80 % cuando decidieron integrar a este grupo de cartoneros, una cifra que representa un ahorro de dos millones de árboles por año, favoreciendo así a nueve millones de ciudadanos incluidos los recicladores cuyo ingreso mensual se duplicó entre 180 y 260 dólares mensual. La creación de centros para reciclaje comunitario y la marcha de programas de recojo selectivo pueden estimular la participación vecinal en zonas donde los sistemas de recolección se hacen puerta a puerta.

2.5. Los rellenos sanitarios, ¿solución o problema?

El desarticulado avance del sistema de producción actual, regido por procesos industriales poco empáticos con el ecosistema y un descontrolado consumo de bienes, ha conducido al más grande desafío del ser humano, de frenar su extinción y la del resto de organismos vivos. Aunque la generación de residuos es algo inherente a las sociedades, promover una cultura ecológica advierte la adopción de posturas responsables frente a la segregación de basura y su adecuado manejo, una tarea compleja de ejecutar cuando el 50 % de los 400 millones de plástico producidos anualmente se crean para un solo uso, y menos del 10 % se reciclan (Piamonte, 2023). Por tanto, el bienestar humano parte de alcanzar cogniciones sobre la preservación de la naturaleza y la adecuada gestión de sus recursos en un contexto socioeconómico que se caracteriza por su inestabilidad (Domínguez *et al.*, 2019).

Los millones de kilos de desperdicios provenientes de las grandes metrópolis demandan cada vez más de sitios especiales para su depósito final y tratamiento. El anhelo de contar con una ciudad limpia conduce a recurrir a los rellenos sanitarios como una solución para la disposición de aquellos restos que no terminan reciclados. Si bien la aparición de estos espacios data de tiempos bíblicos, el concepto moderno aparece a inicios del siglo XX en Estados Unidos e Inglaterra, como respuesta a los malos olores y vectores producidos por la basura dispersa a cielo abierto. Al convertirse en fuente de malestares por su cercanía a las viviendas, las autoridades deciden concentrar todos los residuos en un solo lugar con el propósito de proteger la salud pública, de ahí que reciben la denominación como relleno sanitario (Torri, citado en Barrera-Valdivia *et al.*, 2022).

En líneas generales, el relleno sanitario es un método tradicional que consiste en ubicar una superficie donde se esparcen los desechos sólidos en el suelo para luego compactarlos al menor volumen posible y así ocupar una pequeña área. El terreno en mención es tratado previamente cubriéndolo con una capa artificial resistente al agua para impedir su posible degradación y contaminar otras fuentes vitales próximas; lo almacenado se entierra bajo sabanas de tierra y se comprimen por última vez. Si bien tales espacios han mejorado su eficiencia con el tiempo y la instalación de tecnologías, la descomposición exotérmica de gran parte de los desechos toma años, desprendiendo lixiviados de alta temperatura que, de no tratarse, corre el riesgo de filtrarse al ciclo natural del agua subterránea y ocasionar un grave peligro para el ambiente y la salud (Navarro, 2021).

A pesar de los controles que puedan aplicarse a los rellenos, enterrar residuos en el suelo siempre tendrá un impacto negativo en el ecosistema. Junto con las sustancias tóxicas que contienen ciertos desechos peligrosos, como el mercurio, ácidos, plomo y otros solventes de los artículos electrónicos, se suma a esta larga lista los gases de efecto invernadero. De acuerdo con algunas firmas de saneamiento ambiental, todo material orgánico cubierto se somete a un

proceso de descomposición anaerobia que libera metano, un gas inflamable y 25 veces más potente que el dióxido de carbono. El gas que emiten los rellenos, explica ASECA (2022), se compone de 35 % a 55% de metano y de 30 % a 44% de dióxido de carbono, el cual puede ser peligroso cuando se acumula en grandes concentraciones y su efecto aumenta entre 84 y 100 veces más durante los primeros 20 años de emisión.

A diferencia de los botaderos de basura ilegales, dispersos sin orden ni capacidad para el tratamiento de los residuos, considerados además focos de infección, un relleno sanitario implica una inversión financiera importante para garantizar el sostenimiento del suelo en uso y su adecuada ubicación. Adicionalmente, para iniciar las operaciones estos deben de cumplir con regulaciones sanitarias y ambientales y respaldar su labor con documentación específica en cuanto a la calificación profesional de los trabajadores, consideraciones en el diseño de la superficie, la tecnología disponible, ente diversos factores (Ecolana, 2020). Es relevante apuntar que la labor de recolector de basura es una de las diez más peligrosas del mundo, debido a las condiciones precarias que dispone para entrar en contacto con la basura aumentando la posibilidad de contraer cualquier enfermedad (López *et al.*, 2021).

Aunque los rellenos sanitarios permiten recuperar tierras improductivas o degradadas por la explotación minera, no intervienen en la revalorización de los residuos, concentrándose solo de unificarlos y sepultarlos. Hasta ahora, la construcción de estos espacios continúa siendo la respuesta más práctica al problema de la acumulación de basura; sin embargo, la urbanización descontrolada hace insuficientes el número de rellenos para el adecuado manejo de los desperdicios urbanos generados por las industrias. Frente a esta situación, es urgente impulsar desde los gobiernos estatales y municipales proyectos que involucren alternativas como el reciclaje y coprocesamiento, procurando una concientización general respecto a la reutilización de los productos para alargar su vida útil, y de esta forma iniciar una economía circular apoyada en modelos de basura cero dentro de la gestión municipal.

2.6. Desafíos en la gestión sostenible de los residuos sólidos

En los últimos años, el simple acto de desechar basura se ha convertido en una de las mayores encrucijadas de la sociedad contemporánea: la crisis mundial de residuos sólidos; la cual se caracteriza por un consumismo desproporcionado y una generación excesiva de restos. Este creciente fenómeno, termina siendo difícil de gestionar por cuanto involucra un cambio profundo de un estilo de vida hasta ahora insostenible, además de repensar el actual modelo económico. Y es que la industria, representada por grandes casas matrices, lideran los récords de contaminación plástica en el globo (Break Free From Plastic, 2023); encabezan la lista multinacionales reconocidas a las cuales se les demanda el rediseño de sus estrategias de negocio, descartando los envases de uso único o el plástico compostable que está lejos de ser una alternativa a los derivados del petróleo.

Se está consumiendo y desechando a un ritmo tan preocupante que resulta forzoso tomar acciones urgentes para lograr cambios a corto plazo. En ese sentido, la gestión de residuos se vuelve determinante para conservar los recursos naturales, el mantenimiento de urbes y mitigar el impacto de la incineración de basura, entre otros que deterioran el suelo, aire y agua, con el objetivo último de cuidar la salud pública y asegurar el desarrollo humano. Sin embargo, toda iniciativa debe superar primero la falta de comprensión respecto de los factores que afectan las etapas del manejo de desechos, procurando vincular a los agentes sociales capacitados e interesados en habilitar un flujo de desperdicio urbano dinámico y eficiente. En esa dirección, será importante tener presente el coste económico como ítem crítico en la infraestructura del sistema de gestión (Hochstrasser-Castillo *et al.*, 2020).

Los municipios son los encargados de llevar a cabo una gestión responsable de la basura, aunque este problema no es ajeno a la participación de los ciudadanos en reconocer cuales son las repercusiones de su consumo. Sin embargo, la entidad local muchas veces enfrenta circunstancias que desbordan su

capacidad operativa para solventarlos y el desafío de un sistema eficiente se ve opacado por una falta de organización y recursos financieros. Está previsto un desembolso de 361 000 millones de dólares en los años venideros para atender un volumen de residuos de 3800 millones de toneladas para el 2050; no obstante, hay un coste oculto derivado de prácticas irresponsables para eliminar basura que rebotan en los indicadores de contaminación, mala salud y cambio climático, los cuales podrían duplicar el monto a 640 300 millones de dólares (United Nations Environment Programme, 2024).

Evidentemente, la Administración pública y los particulares cumplen funciones claves en la dirección y articulación de estrategias orientadas al manejo sostenible de residuos. En sus manos recae la estructura de un plan nacional que priorice el proceso de minimización asociado a un consumo y producción responsable, promoviendo alternativas que alienten la reutilización y den pie a una economía circular. Bajo dicha lógica, es posible comenzar con incentivos que despierten el interés de los consumidores para generar menos residuos en sus domicilios, formular guías que enseñen cómo darles nueva vida útil a los restantes orgánicos o generar valor a los artículos desechados (Callihuanca, 2021). En paralelo, es importante resolver obstáculos que limitan cumplir metas como la falta de infraestructura para tratamiento de residuos y aumentar programas de segregación monitoreados.

2.7. Nivel de conciencia ecológica en la opinión pública

La continua degradación del planeta ha motivado un sinnúmero de iniciativas enfocadas en frenar una crisis climática hoy ligada a la pérdida de la biodiversidad y contaminación, una figura de triple emergencia ambiental adoptada por las Naciones Unidas. Comprender que las decisiones domésticas y los hábitos de consumo comportan un impacto ambiental, ha sido la punta de lanza de los enfoques científicos y el activismo social principalmente en su intento por despertar una conciencia ambiental que profundice en la interacción

del hombre con la naturaleza y su enorme dependencia para lograr un buen vivir (Torres & García, 2021). Exponer los límites de la capacidad del ecosistema para seguir sosteniendo las demandas de la humanidad ha sido un arduo trabajo de la comunicación ecológica que se refleja en los programas de reciclaje y campañas de incentivo ecológico propuestos.

Sin embargo, a pesar de las acciones promovidas, la respuesta no ha sido completamente satisfactoria y se cuenta ahora con una opinión pública si bien atenta a los excesos contra el medio ambiente, conductualmente se siente aún poco comprometida y timorata con las causas ecológicas. Aun así, la realidad del cambio climático dejó de ser una disputa y las posturas divergentes dieron paso a un consenso global en defensa del hábitat, un contexto prometedor que ha encontrado eco sobre todo en la esfera digital. La preocupación social por el entorno logró un repunte en redes sociales alcanzando un 16 % durante los últimos cinco años, un indicador que habla de 30 a 50 millones de menciones sobre biodiversidad en Google, y aún más, desde el 2016 se vienen recogiendo más de 159 millones de firmas en apoyo de campañas ligadas a esta *keyword* (World Wildlife Fund, 2021).

Muchas de las movilizaciones acaecidas en defensa del derecho a un ambiente saludable, son reacciones puntuales frente al abuso de la industria, pero impulsadas por sentimientos de impotencia y ofuscamiento. Detrás de estos grupos no existe una agenda ambientalista, y los compromisos van surgiendo en el fragor de la lucha; sin embargo, el fortalecimiento de la idea del medioambiente como un valor intrínseco no termina de consolidarse o está latente, y en ambos casos resulta insuficiente para justificar el carácter ecologista de estos colectivos o la hipótesis de su transición hacia una sólida conciencia ambiental. Y es que, adoptar una filosofía verde viene de un aprendizaje distante de creencias o ideologías; tal cual apuntaron Laso *et al.*, (2019), la conciencia ambiental es una simbiosis de actitudes, saberes, percepciones y comportamientos, modelada por ciertos rasgos psicológicos.

En estos últimos años, debido a sendos atropellos ambientales ligados especialmente con los conflictos minero-energéticos y la última pandemia, la ciudadanía parece estar mejor informada y aparentemente existe mayor empatía hacia la protección del paisaje natural, aunque todavía es menos importante que los temas de corrupción, delincuencia, las malas condiciones laborales, política o educación. Ahora bien, en el contexto internacional han sido los movimientos ecologistas los responsables de articular acciones decididas en pro del cuidado ambiental, pero, últimamente se han ido sumando discursos políticos, órganos no gubernamentales, normas legislativas e iniciativas empresariales convencidos de alzar su voz para internalizar en otros la urgencia de preservar el hábitat y disminuir la polución a través del manejo sostenible de los recursos naturales (Gonzales *et al.*, 2019).

CAPÍTULO III

BIOENERGÉTICA DE LOS DESECHOS URBANOS

Uno de los más importantes desafíos del mundo actual tiene que ver con la diversificación y búsqueda de nuevas fuentes de energía sostenibles; alternativas al combustible fósil y amigables con el medio ambiente. En un panorama de cambio climático y ante la premura de generar bioenergéticos que ayuden a reducir la huella de carbono, es necesario realizar cambios en los modelos de producción y utilización de energía. Es así como los desechos tanto orgánicos como inorgánicos, aparecen como una valiosa opción para el suministro de energía más limpia que, junto con otras renovables como son el viento, sol y agua, la producción de biocombustibles se basa en transformar la biomasa a través de tecnologías como la digestión anaeróbica, incineración con recuperación de energía y la gasificación para la obtención del biogás, electricidad o calor.

Estos procedimientos de conversión para aprovechar los residuos acumulados dependen del tipo, características y volumen de la materia orgánica disponible, los cuales se aplican acorde con los estándares ambientales y las condiciones económicas de cada lugar. Como fuente de energía, la biomasa presenta múltiples bondades; en principio, ayuda a dar una segunda vida útil a los remanentes que terminan muchas veces degradándose en los varios vertederos o rellenos sanitarios de las ciudades, provocando la contaminación del aire con los gases de efecto invernadero, además del suelo y las fuentes de agua cercanas. De otro lado, contribuye a una gestión sostenible del residuo urbano,

reduciendo la dependencia del combustible fósil; una medida que debe replicarse en la conciencia del ciudadano para modificar sus hábitos de consumo y mejorar su interacción con la naturaleza.

3.1. Los residuos sólidos urbanos como insumo biomásico

La exorbitante cantidad de residuos que salen de los domicilios, oficinas e industrias viene provocando un fenómeno global que compromete la tarea municipal para su disposición adecuada. Su deficiente manejo, provoca severos daños ambientales y socioeconómicos que afectan sobremanera a los más pobres, muchos de ellos cartoneros vecinos de los vertederos de basura que alimentan la red de reciclado y mueren sepultados bajo pilas de desechos debido a los deslizamientos. Un promedio de 35 personas, perecieron asfixiadas cuando montañas de basura les cayeron encima y hace unos años, en Etiopía, una tragedia similar mató a 115 pobladores; según informó Reuters (2024), estas desdichas son usuales en otras partes de África. De esta manera, se afecta la vida de personajes claves parte del ciclo de reutilización de restos sólidos en grandes urbes, afectando el sistema en general.

En su intento por responder eficientemente a esta crisis, las autoridades han puesto el foco en la búsqueda y aplicación de fuentes de energía renovable; entre ellas la bioenergía que proviene de la conversión de biomasa. Basados en la idea de que en todo proceso natural la materia no tiene desperdicio porque se incorpora a nuevas fases, se procura aprovechar la fracción residual de los desechos sólidos, la cual es biomasa en su gran porcentaje, para transformarla en líquidos y gases que sirvan de combustible o participen en la generación de electricidad. La biomasa residual es atractiva debido a sus biomoléculas de proteínas, lípidos, carbohidratos y minerales fáciles de recuperar mediante procedimientos físicos, químicos y biológicos; gracias a estas conversiones termoquímicas es posible obtener una multiplicidad de productos de valor cuya calidad depende de las condiciones operativas.

El tratamiento de los desperdicios de las metrópolis tiene como propósito proteger la salud del ciudadano, reduciendo su exposición a infecciones causadas por la acumulación de la basura, y evitar los impactos que degradan el ecosistema y, en consecuencia, obstaculicen el desarrollo de la vida en el planeta. Diversos países evalúan con interés el gran potencial energético de los residuos orgánicos, además, sus cobeneficios auguran mejores ingresos económicos, la descarbonización del ambiente, salud pública y nuevos empleos (Política y Legislación Ambiental [Polea], 2019). En la Unión Europea, las energías producidas con biomasa generaron casi el 38 % de la electricidad en 2021 (Our World in Data, 2022). En Suecia, por ejemplo, la biomasa aporta más de la mitad del calor en los hogares y los subsidios en Reino Unido permitieron aumentar su capacidad instalada para transformar biomasa en energía, entre otros casos.

A diferencia de la década anterior, se prevé que la generación de restos sólidos aumentará durante la presente en todo el mundo. Los datos registran una producción por año de 2100 millones hasta 2300 millones de toneladas de basura urbana, entre plásticos, alimentos y equipos electrónicos, no obstante, solo hasta un 62 % de lo acumulado se llega a gestionar en instalaciones controladas (Naciones Unidas, 2024); mientras lo demás se deja disperso en lugares poco adecuados o en parcelas agrarias para su descomposición aerobia; lo cual abre paso a un complejo problema de contaminación. Por ello, es crucial implementar nuevos mecanismos de conversión de la biomasa en aquellas biorrefinerías dedicadas a elaborar biocombustibles de granos, grasas o aceites, y residuo orgánico en menores proporciones (Renewable Fuels Association [RFA], 2021) como solución estratégica ante su deficiente aprovechamiento municipal.

Ahora bien, aunque la biomasa también libera CO₂, este es de ciclo muerto pues se absorbe durante el crecimiento de la vegetación, mientras que los óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas dependen del proceso de combustión y las condiciones de ventilación usadas. Para dar inicio a una transición sin perturbaciones, es preciso establecer mecanismos que faciliten superar altos costes de inversión y mantenimiento, diseñar nuevas estrategias de producción,

ajustar la clasificación de la biomasa y establecer alianzas público-privadas para la inversión y operación de proyectos, además de promover vínculos con centros de estudio que aporten en la investigación, el desarrollo e innovación del sector. Finalmente, los estudios demuestran que América Latina y África Subsahariana podrían encabezar el progreso de la bioeconomía dado su potencial energético (Vargas-García *et al.*, 2022).

3.2. ¿Qué es el biogás? Aspectos principales

El biogás es una fuente de energía apreciada desde tiempos antiguos, desde los procesos rudimentarios usados por chinos y persas, seguida de una primera planta construida en la India en 1859, hasta llegar a la década del 70, en plena crisis energética, cuando se decidió extender la búsqueda y desarrollo de nuevas fuentes de energía, incluido el biogás. A día de hoy, con la crisis climática a cuestas y el desafío de reducir la huella de carbono en el medio ambiente, los países del mundo han virado su interés hacia los múltiples beneficios que ofrece adoptar esta tecnología y la producir biogás a partir de los residuos y biomasa lignocelulósica. Se prevé que el menor costo de las energías renovables impulse su rápido crecimiento hasta un 50 % para 2030, y una vez superados diversos obstáculos que logre un 85 % de la generación global energética hacia el 2050 (McKinsey & Company, 2023).

Al respecto, el biogás se ha posicionado como una opción prometedora, aupada con gran éxito en los lineamientos energéticos de países como Alemania y Dinamarca, los pioneros en instaurar plantas modernas de este recurso. El biogás, también llamado biometano, es un combustible renovable preparado a partir de la degradación del desecho orgánico que proviene del sector alimentario, agrícola o ganadero; estos pueden ser estiércol de animal, la basura municipal, remanentes vegetales, la fracción orgánica de restos domésticos y el lodo de estaciones depuradoras de aguas residuales. Este gas se compone principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) en porcentajes

variables dependiendo de la composición del extracto orgánico del cual tiene origen. En líneas generales, toda materia orgánica biodegradable puede ser una fuente de este biocombustible.

De acuerdo con los reportes pre pandemia, el 26 % de los gases de efecto invernadero en el mundo provenían de la industria de los alimentos (Ritchie, 2019). A la par, en el mundo se perdía un tercio de toda la comida producida, es decir, un promedio de 1.3 mil millones de toneladas (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [Odepa], 2019) que se echaban a perder, contribuyendo más con la polución del aire y el malgasto de recursos como el agua, la energía y los fertilizantes. Actualmente, existe un buen número de plantas de biogás instaladas que operan en todo el mundo, sobre todo en China, los Estados Unidos y Europa. Si bien el consumo del biometano representa un 0,3 % del mercado energético global, existe un crecimiento sostenido de su producción en la última década, bastante cercano del 40 %, una tendencia que representó incrementos del 4 % anual entre el 2010 y 2018 (IEA, 2020).

De momento, la industria del biogás debe servirse del interés ganado para lograr ventajas competitivas frente al gas natural, y reducir su costo de purificación como primer desafío. Esto ha motivado que los países deriven incentivos económicos a favor de la producción de biometano para inyectar en la red de distribución y proveer al sector transporte (FAO, 2019). No obstante, aunque persisten contratiempos técnicos y económicos, los conflictos de orden legal y sociocultural deben captar la mayor atención para superarlos a favor del incremento de bioenergía en la matriz energética nacional, pero con proporciones limpias y eficientes. En definitiva, las metas de sostenibilidad tienen en el biogás a un socio eficaz para minimizar la huella ambiental, integrando comunidades energéticamente vulnerables y creando nuevos puestos de trabajo en zonas rurales, además de movilizar inversiones.

3.3. Proceso de obtención del biogás

La distribución irregular de las reservas de petróleo en el mundo, y un más que previsible declive en la producción del combustible fósil; imponen acudir a otras fuentes que puedan responder adecuadamente a la ingente demanda energética de los mercados. A diferencia de sus pares, el biogás es la única energía renovable cuya versatilidad le permite ser usada en cualquiera de las aplicaciones eléctricas, térmicas o como carburante. La obtención del biogás inicia con una recolección selectiva del extracto orgánico que viene de la actividad ganadera, agroindustrial y doméstica; es decir, sin materiales contaminantes inorgánicos como plásticos, vidrio o metales que puedan afectar algunas de las etapas del proceso de producción (Instituto Tecnológico del Plástico [Aimplas], 2023). El acopio de los remanentes orgánicos puede realizarse a nivel doméstico, industrial o apoyado en sistemas de recogida selectiva.

La fabricación del biogás se realiza mediante una descomposición biológica en ausencia de oxígeno, también conocido como digestión anaeróbica o proceso microbiano durante el cual intervienen diversos microorganismos, principalmente las bacterias fermentativas, acetogénicas y arqueas metanogénicas que transforman la materia orgánica en moléculas y gases. Los componentes habituales son el metano y dióxido de carbono en proporciones de 60 % y un 40 %, respectivamente, sin embargo, los porcentajes variarán en función del tipo de sustancia elegida para la combustión, en consecuencia, lo más común es descubrir parámetros que van del 45 % a un 75 % de metano mientras que, respecto al CO₂ el rango disminuye entre un 55 % hasta llegar al 25 % aproximadamente (Pratt, 2022). Asimismo, también contiene pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno, siloxanos y humedad.

Existen ciertas consideraciones en el metabolismo microbiano que deben ser controlados para garantizar el óptimo cumplimiento de cada fase del proceso anaerobio. Algunos de ellos están relacionados con el pH, tiempos de residencia, la demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de sólidos totales y

volátiles, biomasa, las condiciones de temperatura, concentración de sustrato, el tamaño de la partícula del sustrato y relación sustrato/inóculo (Castro-Rivera *et al.*, 2020). Aunque el biogás se considera un energético limpio, llega a tener un impacto en el medio ambiente, aunque neutro en carbono, debido a que su origen es materia vegetal. Además, se somete a un sistema que destaca por su poca complejidad operativa, no genera olores desagradables y reduce al máximo la presencia de organismos patógenos como son las coliformes fecales.

Durante el proceso anaeróbico para la obtención del biogás tienen lugar cuatro momentos diferenciados; en una primera etapa de hidrólisis, los sustratos complejos como proteínas, carbohidratos, azúcares, aminoácidos y las grasas se descomponen en moléculas sencillas o monómeros por acción de ciertas enzimas. Luego, en la etapa de acidogénesis, bacterias acidogénicas convierten los productos anteriores en ácidos grasos volátiles, como el ácido propiónico, butírico, valérico y acético. A continuación, las bacterias acetogénicas de la etapa de acetogénesis transforman los ácidos grasos volátiles en hidrógeno y dióxido de carbono, para culminar con la metanogénesis, momento cuando bacterias metanogénicas convierten el total de productos de las etapas anteriores en los componentes del biogás, como son el dióxido de carbono y metano (Suárez-Chernov *et al.*, 2019).

Durante este proceso, si el biogás contiene un mínimo de 45 % de metano se le considera un combustible limpio y renovable (Castro-Rivera *et al.*, 2020), que puede crearse a gran escala en centros con capacidad para manejar toneladas de restos orgánicos industriales. Igualmente, también la desgasificación puede hacerse en vertederos o reactores cerrados comúnmente conocidos como digestores anaerobios; de esta manera, se procura impulsar una economía circular que aproveche los recursos esparcidos en lugar de acumularlos en espacios inseguros. Por el contrario, los sustratos orgánicos en los digestores anaerobios deben guardar condiciones puntuales de operación asociadas con el tiempo de residencia, la temperatura, entre otras; no obstante, es posible incre-

mentar su rendimiento mezclando otro tipo de materias bien seleccionadas para no inhibir los procesos biológicos.

3.4. Ventajas y aplicaciones del biogás

La transición progresiva hacia un modelo energético sostenible, es un punto determinante en la meta de reducir las peligrosas emisiones de carbono y así garantizar la supervivencia de las especies vivas en el planeta. En dicha encrucijada, la producción de gases limpios como el biogás y biometano aportan ventajas únicas no solo con fines ecológicos; también tiene efectos positivos en el campo socioeconómico, sobre todo al reducir la dependencia comercial del combustible foráneo. Además, sus contribuciones a nivel técnico permiten lograr un alto rendimiento en procesos productivos concretos de las industrias intensivas; junto con emisiones neutras de CO₂ en sectores de difícil electrificación (García-Ceca, 2024), como la agricultura, el calor doméstico, la ganadería y el transporte pesado, de esta manera es posible un sistema energético de mayor fiabilidad y flexibilidad.

La producción de biogás permite aprovechar la enorme cantidad de metano y dióxido de carbono liberado en los rellenos sanitarios, pero también de las emisiones gastroentéricas del ganado y su estiércol, los cuales representan aproximadamente el 32 % de los gases que causan el calentamiento global (United Nations Environment Programme [UNEP], 2021). Valorizar estos residuos orgánicos y convertirlos en una fuente de energía limpia, ayuda a disminuir el peso y volumen de los desechos sólidos acumulados en vertederos, reduciendo así la probabilidad de contaminar suelos y aguas. En consecuencia, el biogás es un recurso energético renovable y atractivo (Ardolino & Arena 2019), cuyo uso y desarrollo puede contribuir de forma significativa a resguardar el ecosistema, aumentar el tiempo de rentabilidad de los depósitos sanitarios y reemplazar a los hidrocarburos fósiles.

Una de las mayores desventajas de asumir el biogás como una realidad energética, es sin duda los altos costos iniciales que demandan implementar esta tecnología, una limitación difícil de afrontar por los países más pobres. Esta situación conduce a seguir dependiendo del combustible fósil, y que actualmente alcanza un 80 % de la energía consumida debido a los beneficios que viene recibiendo su producción por parte de diferentes legislaciones. De acuerdo con el reporte anual publicado en *The Lancet* (Romanello *et al.*, 2022), 69 de los 86 Gobiernos analizados ofrecieron subsidios al combustible tradicional por 400 000 millones de dólares en 2019, y de ese total, el 10 % superó el gasto sanitario nacional en 31 países y 100 % en otros cinco. Igualmente, en el documento se lee la falta de voluntad para invertir en la lucha contra la crisis climática señalada en el Acuerdo de Copenhague.

Pese a este clima de incertidumbre mundial, la energía alternativa se mantiene en un claro ascenso frente a la tendencia de prescindir, cada vez más, de una electricidad basada en el combustible fósil. A fines del 2022, informó Irena (2023) que la capacidad mundial de generación renovable tuvo un crecimiento récord de 295 GW, lo cual se traduce en un 83 % del consumo eléctrico añadido el año anterior, un indicador impensable cuando hace apenas unas décadas representaba un porcentaje ínfimo. Ahora, la electricidad renovable es mucho más barata que la obtenida de su par tradicional y, si bien la energía del biogás es aún poco usada, su desarrollo facilitará una transición energética sin subsidios estatales grandes, pero con un notable ahorro de dinero, pues se crea con base en recursos naturales renovables que no dependen de las condiciones climáticas para su generación.

Proponer conocer las ventajas que ofrece el biogás se convierte en una necesidad social, y comprender su potencial permitirá resolver el problema de los remanentes urbanos mal gestionados que se pierden en vertederos y depuradoras. Aunque la producción global de biogás y biometano equivale al 1 % del total del gas natural, su potencial es muy superior y podría reemplazar

el 20 % de la demanda mundial actual hasta reducir 1,5 gigatoneladas de CO₂ de emisiones (Raso, 2021); sin embargo, el insuficiente apoyo al sector impide su despegue definitivo. En el mercado, más de la mitad del volumen producido se concentra en Europa y China con fines domésticos e industriales, mientras lo demás se consume en cantidades discretas en comunidades rurales muy cerca de las plantas generadoras para el suministro de electricidad y energía calorífica.

Es importante señalar que muchas de las estaciones de producción del biocombustible se pueden instalar en núcleos urbanos como en las zonas rurales más remotas, por lo mismo, la disponibilidad de calor y energía es posible en cualquier lugar y en todo momento. Es así que con el uso del biogás se pretende dar solución a la crisis climática y social causada por la generación indiscriminada de restos sólidos, además surge como opción energética para los países emergentes, aporta en la vertebración del territorio e impulsa la economía de las zonas agroalimentarias con base en el autoconsumo. La gestión de restos orgánicos como purines o la paja del arroz en las granjas ganaderas mediante esta tecnología, supone darle valor a insumos que significan un gasto para su depuración, y convertirlos en ahorro de energía, generando una gran oportunidad para la sostenibilidad del ecosistema.

3.5. El futuro del mercado de energía con biomasa sólida

La adopción de combustibles sostenibles fabricados con residuos de biomasa, se convierte en una alternativa importante dentro de la estrategia mundial para restablecer el balance de carbono en el ambiente. Pero reducir la emisión de gases contaminantes y mantenerlo en niveles óptimos, plantea complejos desafíos cuando se trata de una tecnología aún en ciernes. Hoy en día, el mercado del biodiésel cubre menos del 1 % de la demanda mundial de petróleo, solo para transporte; con un pronóstico de crecimiento de 1,5 millones de b/d para la década de 2030, además de una pequeña fracción del rubro de la aviación de

hasta 0,2 millones (Flowers, 2020). A pesar de los dígitos, es el sector de más rápida evolución que cualquier otro segmento de combustible, debido básicamente a la acelerada tendencia de prescindir del crudo fósil para los motores de los vehículos.

Si bien el biodiésel tiene un alto potencial durante la transición energética, sostener el ingente consumo global requerirá de grandes inversiones y una tecnología de punta que permita una producción acelerada del combustible con un contenido de biomasa superior al estándar de ahora, con mayor resistencia corrosiva, lubricidad y neutralidad de carbono. Aunque los augurios son positivos, el biodiésel solo podría aportar en la descarbonización del transporte a razón de un limitado volumen de materia prima que impediría lograr una mejor rentabilidad. Al respecto, el comercio global de aceite vegetal registró un promedio anual de 200 Mt para el 2019, mientras que, los viajes aéreos y por carretera necesitaron abastecerse con cerca de 1200 Mt (Roca, 2020). Se trata, por tanto, de una apuesta a largo plazo por un modelo energético técnicamente probado, pero aún no comercial.

La urgencia de abordar el cambio climático con la aplicación de combustibles renovables, obliga a pensar un conjunto de medidas que vayan de la mano con la dinámica actual del mercado energético. En 2020, por ejemplo, 65 países formularon directrices vinculadas a promover las energías no tradicionales con diferentes grados de rigidez; e igualmente las legislaciones de Noruega y Suecia se modificaron a favor del biocombustible de aviación (Torroba, 2021). En este grupo de países, el gobierno francés resalta en el establecimiento de objetivos para los gases renovables, implementando múltiples lineamientos que buscan apoyar su producción con una tarifa de alimentación, maximizar el uso de los excedentes derivados de actividades productivas, fomentar la colaboración con operadores de redes de gas, y otras que impulsaron la expansión de nuevas plantas de biometano en Europa.

Sin embargo, no existen intenciones similares en otros continentes donde las regulaciones tengan una visión holística que contemple acciones para impulsar el uso de la bioenergía; aun cuando muchas naciones disponen de los recursos de materias primas, los mismos no cuentan con planes para explotarlos responsablemente y así poder autoabastecerse. En el caso del biometano, su impulso a nivel mundial se ve afectado por un esquema normativo burocratizado, con procesos de larga espera para las aprobaciones sobre manipulación de residuos, emisiones a la atmósfera y el agua, gestión del digestato, seguridad, y otros que, retrasan o desalientan alcanzar las metas de producción. Aunque los marcos legales son necesarios, estos deben considerar los diversos contextos e interpretaciones entre regiones que pueden complicar el desarrollo internacional y la estandarización de procesos.

Es fundamental revisar y ajustar los procedimientos que signifiquen un obstáculo para el desarrollo del sector; ofreciendo incentivos financieros para la generación de electricidad proveniente de fuentes renovables, marcos de subasta competitiva para el rubro eléctrico, reducir el riesgo financiero, préstamos blandos bajo condiciones favorables o las garantías de préstamos del sector público, todas ellas, políticas destinadas a reducir los riesgos de inversión que ayuden a despejar cualquier incertidumbre respecto al potencial innovador del biocombustible (Romero, 2023). Del mismo modo, sembrar mecanismos que faciliten la disponibilidad de materias primas junto con palancas administrativas que determinen cuotas obligatorias para proveedores en pos de una inversión segura. Es claro que el futuro de las fuentes renovables depende de reglas amplias y políticas de demanda equilibradas para impulsar el desarrollo sostenible del mercado bioenergético a nivel global.

CAPÍTULO IV

GENERACIÓN DE BIOENERGÍA A PARTIR DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Gestionar residuos representa una ardua labor para el gobierno local como principal responsable, e incluye a los diferentes actores de las comunidades. De acuerdo con sus funciones, la población debe estimular conductas saludables para mantener su entorno, mientras que los municipios deben garantizar el recojo de los residuos de origen doméstico. A su vez, es necesario implementar políticas para incentivar la participación. En relación con este punto, Ariza *et al.* (2020) consideran importante agrupar acciones de recopilación de información técnica donde la comunidad participe activamente, mientras que Mondal *et al.* (2023) destacan el rol de las empresas, las cuales deben trabajar para crear soluciones de gestión sostenibles.

Es preciso considerar todo lo relacionado con el tratamiento de residuos sólidos como esencial para alcanzar un desarrollo sostenible (DS), el cual implica la visión de que los sistemas sociales y medioambientales tienen la misma relevancia que los sistemas económicos (Antúnez *et al.*, 2020). Precisamente, su importancia recae en la elaboración de estrategias conforme a los intereses de las naciones desarrolladas y de aquellas en vías de desarrollo (Noboa *et al.*, 2021). Para ello, las empresas deben tener responsabilidad so-

cial para autorregular la producción y abordar cuestiones sociales, medioambientales y de crecimiento económico (Vuong & Bui, 2023). En tal sentido, Martínez *et al.* (2020), en su estudio, hallaron necesaria la convivencia orgánica de diferentes actores, tanto gubernamentales como no gubernamentales, para la proyección de planes e iniciativas ya aceptadas por la comunidad, tomando en cuenta la perspectiva cultural.

Por su parte, Manero (2020) detectó que la expansión de la política del desarrollo sostenible continúa extendiéndose mediante los acuerdos de libre comercio alcanzados con diversas naciones de América, Asia y Europa, con el propósito de alcanzar el objetivo de extender dichas políticas por medio de la Unión Europea. En este contexto, Manzanares (2020) afirma que la funcionalidad del desarrollo sostenible en los manejos públicos implica la articulación de múltiples dimensiones (económica, social, ecológica, etc.) en diversos planos (internacional, nacional y local), con la influencia de distintos actores, tales como el Estado, las empresas, ONG, entre otros. En consecuencia, complementan De la Rosa *et al.* (2019) sobre la Agenda 2030, que declara que es preciso avanzar en el desarrollo sostenible a través de la instrucción, así como del fomento de una cultura de paz, ciudadanía global y el papel de la ciencia en el desarrollo sostenible.

Asimismo, según la investigación de Almeida & Díaz (2020), en la actualidad existen muchos modelos para hacer frente a la problemática provocada por un sistema lineal de producción y consumo. Entre estos modelos se encuentra la economía circular, la cual tiene por objetivo alcanzar el éxito financiero y la viabilidad del cambio de paradigma hacia el tópico medioambiental. Molina & Zaldumbide (2020) encontraron que este modelo trabaja como un ciclo continuo de desarrollo positivo que gestiona las reservas y los flujos renovables para proteger y mejorar la naturaleza, y que el rendimiento de los recursos sea maximizado.

Una gestión sostenible precisa de la intervención de los gobiernos locales, las comunidades y las empresas, como ya fue señalado, de allí que a nivel político y económico se ha iniciado un interés por disminuir el impacto que la actividad humana ha generado a nivel local, en especial para mitigar el cambio climático. Entre las soluciones planteadas para solventar dicha situación se encuentra la sustitución de las principales fuentes energéticas de origen fósil por otras opciones como las ofrecidas por las bioenergías (Akdag & Yildirim 2020; Eskander & Fankhauser 2020; Mi *et al.* 2018; Kätelhön *et al.* 2019).

De acuerdo con Castelao (2020), la bioenergía es definida como:

Un tipo de energía de fuentes renovables producida a partir de la conversión de biomasa —materia orgánica de origen vegetal o animal no fósil— en vectores energéticos adecuados para la generación de energía eléctrica, térmica o mecánica. Según su origen, es clasificada en biomasa de origen residual, biomasa natural proveniente de ecosistemas naturales (bosques y plantaciones) y biomasa de cultivos energéticos. (p. 58)

En ese sentido, la bioenergía representa una alternativa energética gestionable de acuerdo a los requerimientos del ciudadano; además, disminuye el impacto ambiental de otras actividades y ofrece insumos para diferentes productos de base biológica. Las industrias que la utilizan cuentan con una serie de tecnologías, y su aplicación dependerá, fundamentalmente, de las particularidades “físicoquímicas de la biomasa, el destino final de la energía, las condiciones climáticas y la escala de producción” (Castelao, 2020, p. 58).

Por otro lado, Paniagua-Gutiérrez *et al.* (2022) señalan que “los residuos sólidos urbanos (RSU) pueden ser tratados como recursos y no como problemas” (p. 26), por lo cual su tratamiento y aprovechamiento tienen una influencia positiva en la salud de la población, así como en el medioambiente. Entre las alternativas que estos autores plantean para el manejo de los RSU se encuentra “la reutilización, el compostaje, la gasificación, la pirólisis y la incineración como técnicas de aprovechamiento” (p. 26).

Con la gasificación y el pirólisis como técnicas, se busca transformar residuos sólidos en gas o combustibles de síntesis mediante la combustión, las cuales se encuentran reguladas en Estados Unidos y la Unión Europea, pues son catalogadas como incineradores de residuos. Asimismo, constituyen una serie de procedimientos de alto consumo energético que pretenden disminuir la cantidad de residuos convirtiéndolos en gas o combustibles de síntesis mediante la combustión (Serrato et al., 2018; Mejía y Upegui, 2021).

4.1. Metodología

Para hacer este análisis se desarrolló una revisión bibliográfica sistemática acerca de las tecnologías utilizadas para generar bioenergía mediante el manejo de RSU. En el proceso de búsqueda se utilizó la metodología Prisma (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Anayses) y sus directrices. Esta metodología ejecuta revisiones sistemáticas, de acuerdo a ciertos criterios que permiten escoger artículos relacionados con el objetivo ya señalado (Page *et al.* 2021).

Fueron seleccionados artículos que describen la tecnología utilizada para generar bioenergía mediante el manejo de RSU. La revisión cuenta con los siguientes criterios de elegibilidad (o de inclusión y exclusión) especificados en la Tabla 5:

Tabla 4. Criterios de elegibilidad

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos en inglés y español	Documentos en otro idioma diferente al inglés y el español
Enfoque en las tecnologías utilizadas para la generación de bioenergía	Estudios que no incluyen tecnologías utilizadas para la generación de bioenergía
Estudios publicados en revistas académicas indizadas en el campo de la gestión pública	Estudios no publicados en revistas académicas reconocidas en el campo de la gestión pública
Estudios empíricos	Estudios no empíricos
Artículos científicos o de revisión	<i>Papers</i> resultado de congresos, tesis o capítulos de libros
Estudios publicados entre 2015 y 2023	Estudios publicados fuera del tiempo establecido

Nota. Elaboración propia

Las bases de datos revisadas para la selección de los artículos requeridos fueron SciELO, WoS y Scopus. En el proceso de búsqueda fueron utilizados los buscadores Google Académico y Crossref; estos hacen más sencilla la búsqueda porque los documentos pueden ordenarse por idioma, título y año. Asimismo, los términos utilizados en la búsqueda de la información fueron “bioenergía”, “manejo de desechos”, “residuos sólidos urbanos” y “tecnología”.

Para conseguir información amplia y precisa, fueron diseñados los términos de búsqueda anteriormente descritos, los cuales se encuentran relacionados con el análisis desarrollado. Al combinar estos términos de búsqueda fueron usados los operadores booleanos “AND” y “OR”, esto con el propósito de afinar la búsqueda y así garantizar la inclusión de estudios que verdaderamente incluyan el vínculo entre la generación de bioenergías y el manejo de los RSU;

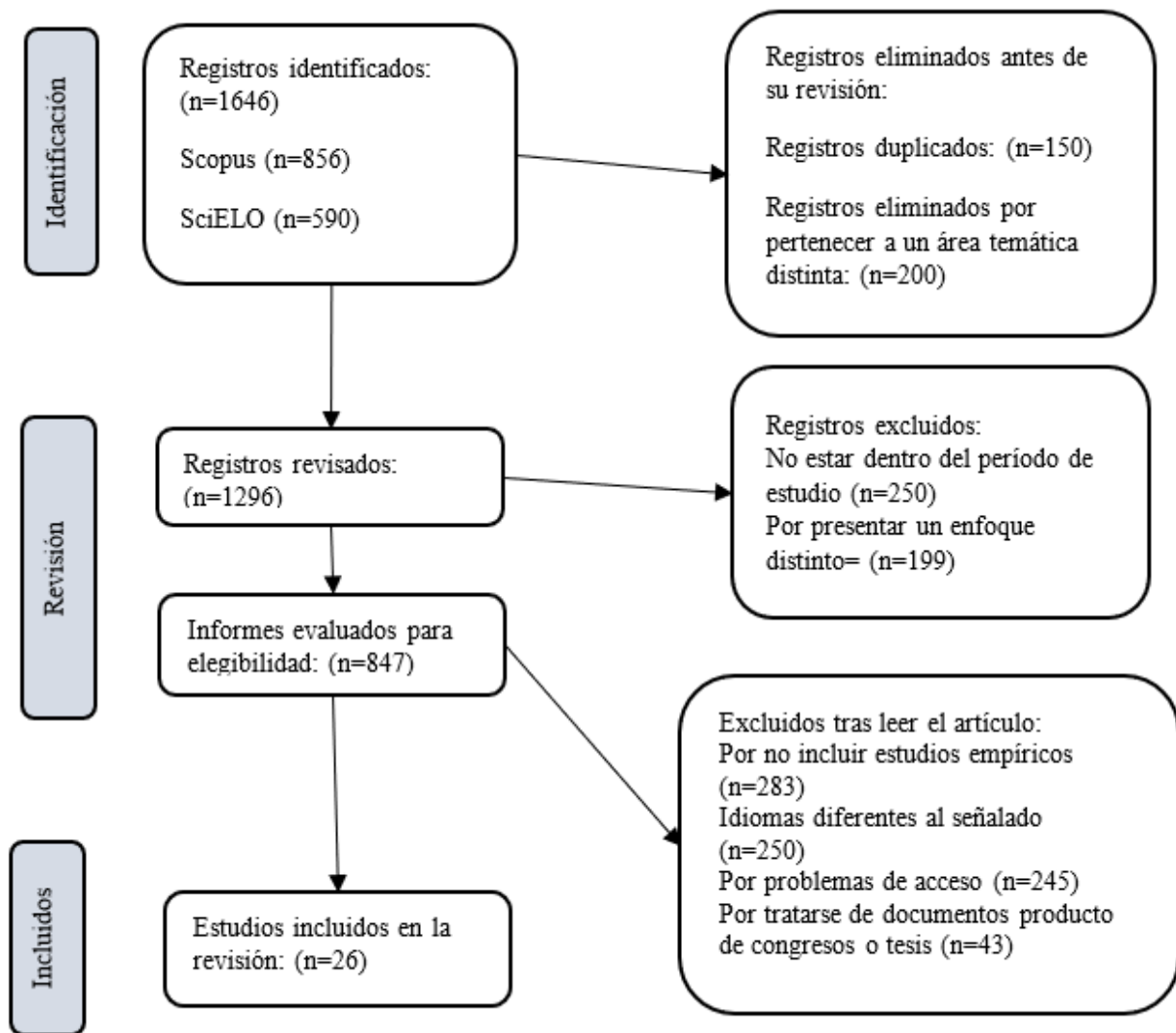
resultando la siguiente ecuación: “Technology” AND (“waste management” OR “bioenergy”) AND “urban solid waste”.

Los operadores booleanos y la combinación de términos de búsqueda permiten tener mayor precisión en la búsqueda realizada y así disminuir el riesgo de omitir estudios importantes, a la vez que se minimiza la inclusión de estudios no pertinentes. Este proceso aseguró que los resultados conseguidos fueran los más acertados, permitiendo que los documentos escogidos fueran adecuados en cuanto a información para ser evaluados y analizados en el proceso de revisión sistemática (Trivisonno *et al.*, 2021).

4.2. Resultados

Una vez aplicada la estrategia de búsqueda, fueron identificados 1646 artículos. En Scopus se localizaron 856 artículos, 590 en SciELO y 200 en WoS. Luego de leer el área temática, título y resumen de todos ellos, se excluyeron 350 (21.2 %); resultando 1296 documentos, de los cuales fueron excluidos 250 por no encontrarse dentro del período de tiempo establecido para la revisión, y 199 por presentar un enfoque temático diferente al referido a la gestión pública y la tecnología. La suma de esta cantidad representó un 27.2 % del segundo cribado aplicado, quedando en este paso del proceso 847 documentos. Finalmente, tras leer la totalidad de los artículos, fueron excluidos 283 por no ser estudios empíricos, 250 por encontrarse en un idioma diferente a los señalados para realizar la revisión, 245 por presentar problemas de acceso y 43 por tratarse de *papers* producto de congresos o tesis; el resultado de este último proceso fue 26 artículos, los cuales cumplían con los criterios de elegibilidad señalados en este estudio (Figura 1).

Figura 1. *Proceso de selección. Flujograma Prisma*



Nota. Elaboración propia

Producto de la revisión realizada, en la Tabla 6 se muestran los datos de los documentos examinados, entre los cuales destaca el año, los autores, el título, el nombre de la revista, el idioma y la base de datos en la cual fueron publicados los artículos.

Tabla 5. Artículos seleccionados para la revisión de publicaciones

Año	Autores	Título	Revista	Idioma	Base de datos
2020	Indrawan <i>et al.</i>	Generación de energía distribuida mediante gasificación de biomasa y residuos sólidos municipales: una revisión	<i>A review. Journal of the Energy Institute.</i>	Inglés	Scopus
2020	Yaashika <i>et al.</i>	Bioconversión de residuos sólidos municipales en bioproductos: una revisión sobre la valorización y el enfoque sostenible para la bioeconomía circular	<i>Science of the Total Environment</i>	Inglés	Scopus
2021	Abdulyekeen <i>et al.</i>	Torrefacción de biomasa: Producción de biocombustible sólido mejorado a partir de Residuos sólidos municipales y otros tipos de biomasa.	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	Inglés	Scopus
2021	Sun <i>et al.</i>	Evaluación tecnoambiental-económica de residuos sólidos urbanos (RSU) para generar energía/combustible mediante rutas basadas en gasificación e incineración	<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	Inglés	Scopus
2020	Uekert <i>et al.</i>	Reformado de residuos sólidos mediante energía solar para un futuro sostenible	<i>Nature Sustainability</i>	Inglés	WoS y Scopus
2021	Hasan <i>et al.</i>	Energy recovery from municipal solid waste by pyrolysis technology: a review of the current status and developments.	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	Inglés	Scopus

2023	Sánchez-Hervas <i>et al.</i>	Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible y simbiosis industrial en la comunidad de Madrid (España)	<i>Revista Tecnología en Marcha</i>	Español	SciELO y WoS
2022	Sabbatella	La economía política internacional de las bioenergías: avances y límites en el mercado eléctrico argentino	<i>Relaciones Internacionales</i>	Español	SciELO
2019	Montiel-Bohórquez y Pérez	Generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos. estrategias termodinámicas para optimizar el desempeño de centrales térmicas	<i>Información tecnológica</i>	Español	SciELO
2021	Alidoosti <i>et al.</i>	Social sustainability of bioenergy treatment technologies. Generation from municipal solid waste using the best and worst method.	<i>Journal of Cleaner Production</i>	Inglés	Scopus
2022	Paniagua-Gutiérrez <i>et al.</i>	Evaluación de la generación de energía a partir de la gasificación de residuos sólidos urbanos en Cochabamba-Bolivia	<i>Investigación & Desarrollo</i>	Español	SciELO
2018	Ayala-Mendivil & Sandoval	Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera	<i>Madera y bosques</i>	Español	WoS
2020	Alvarado & Rangel	Revisión de estrategias sostenibles para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las organizaciones	<i>Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales</i>	Español	WoS

2019	Nogar <i>et al.</i>	Bioenergía a partir de residuos ganaderos. Estado de situación en provincia de Buenos Aires	<i>Mundo agrario</i>	Español	WoS, SciELO y Scopus
2023	Blanco	Evaluación <i>ex ante</i> financiera, socioeconómica y ambiental de un gasificador de 300 kw para generar electricidad con residuos agrícola en León, Nicaragua	<i>Nexo Revista Científica,</i>	Español	WoS
2020	Ibbett <i>et al.</i>	Digestión enzimática de biofibra a partir de sólidos municipales tratados térmicamente mecánicamente. Residuos: acceso a datos de diseño cinético y reológico utilizando una escala piloto. mezclador de alto contenido de sólidos	<i>Biomass and Bioenergy</i>	Inglés	Scopus
2021	Bernat <i>et al.</i>	Lixiviado tras la estabilización aeróbica de residuos sólidos municipales complementados por la glicerina residual de la saponificación para mejorar la producción de biogás durante la codigestión	<i>Biomass and Bioenergy</i>	Inglés	Scopus
2020	Franca y Bassin	El papel de la digestión anaeróbica seca en el tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales: una revisión sistemática	<i>Biomass and Bioenergy</i>	Inglés	Scopus
2017	Zahedi <i>et al.</i>	Generación de bioenergía a partir de residuos sólidos municipales y residuos de glicerina: dinámica poblacional	<i>Energy & Fuels</i>	Inglés	WoS y Scopus

2021	Kohansal <i>et al.</i>	Licuefacción hidrotermal de residuos sólidos urbanos pretratados (biopulpa) con recirculación de fase acuosa concentrada	<i>Biomass and Bioenergy</i>	Inglés	Scopus
2022	Gadaleta <i>et al.</i>	Opciones de valorización energética para la gestión de bioplásticos a base de celulosa y residuos sólidos urbanos mixtos	<i>Biomass and Bioenergy</i>	Inglés	Scopus
2019	Ayodele <i>et al.</i>	Generación eléctrica prospectiva de hidrógeno derivado del biogás utilizando Desperdicio de alimentos en el suroeste de Nigeria	<i>Biomass and Bioenergy</i>	Inglés	Scopus
2021	Blanco	Generación de energía eléctrica en sistemas de generación distribuida de pequeña escala usando bioenergía en Nicaragua	<i>Revista fuentes, el reventón energético</i>	Español	Scopus
2022	Sosa-Cabrera	Alternativas bioenergéticas de los residuos sólidos urbanos: panorama en México	<i>Letras Verdes. Revista Latinoamericana De Estudios Socioambientales</i>	Español	WoS
2021	Hameed <i>et al.</i>	La gasificación de residuos sólidos urbanos se mezcla con biomasa para generar energía Producción y recuperación de recursos: estado actual, tecnologías híbridas y perspectivas innovadoras	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	Español	Scopus
2019	Tsui & Wong	Una revisión crítica: bioeconomía emergente y conversión de residuos en energía Tecnologías para la gestión sostenible de residuos sólidos municipales.	<i>Waste Disposal & Sustainable Energy</i>	Inglés	Scopus

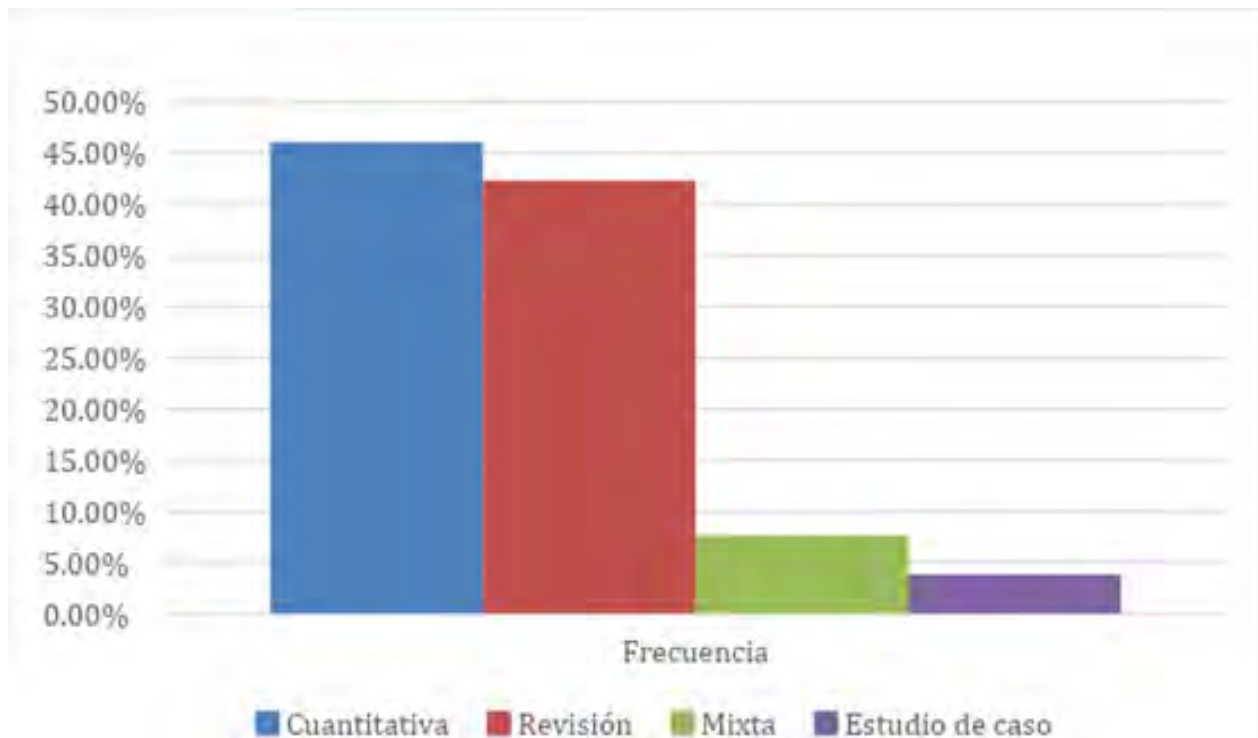
Nota. Elaboración propia

4.3. Discusión

La Figura 3 muestra cómo han evolucionado las publicaciones sobre las tecnologías utilizadas para generar bioenergía a través del manejo de RSU. La muestra final estuvo constituida por 24 artículos, de los cuales el 46,1 % presentó un enfoque cuantitativo; 42, 3 %, revisiones; 7, 6 %, estudios mixtos y uno (3,8 %) fue un estudio de caso. En relación con el idioma en el que se publicaron los estudios, se observa que predomina el inglés con 15 publicaciones del total de documentos revisados; esto representa un 57, 6 %; mientras que 11 artículos (42, 3 %) fueron publicados en español. El 2021 presentó la mayor cantidad de publicaciones (8 artículos), 2020 tuvo 6, 2019 y 2022 presentaron la misma cantidad (4), 2023 tuvo 2 publicaciones, y 2017 y 2018, un solo artículo cada uno.

En relación con la base de datos utilizada para la publicación de los artículos, destaca Scopus con 16 documentos, y SciELO y WoS con 3 cada una; asimismo, se observó que uno de los artículos fue publicado en una revista que se encuentra indexada en WoS y en Scopus. Otro artículo, en una revista SciELO-WoS; finalmente, se revisó un documento cuya revista de publicación presentó indexación en las tres bases de datos señaladas en el presente estudio como criterio de inclusión.

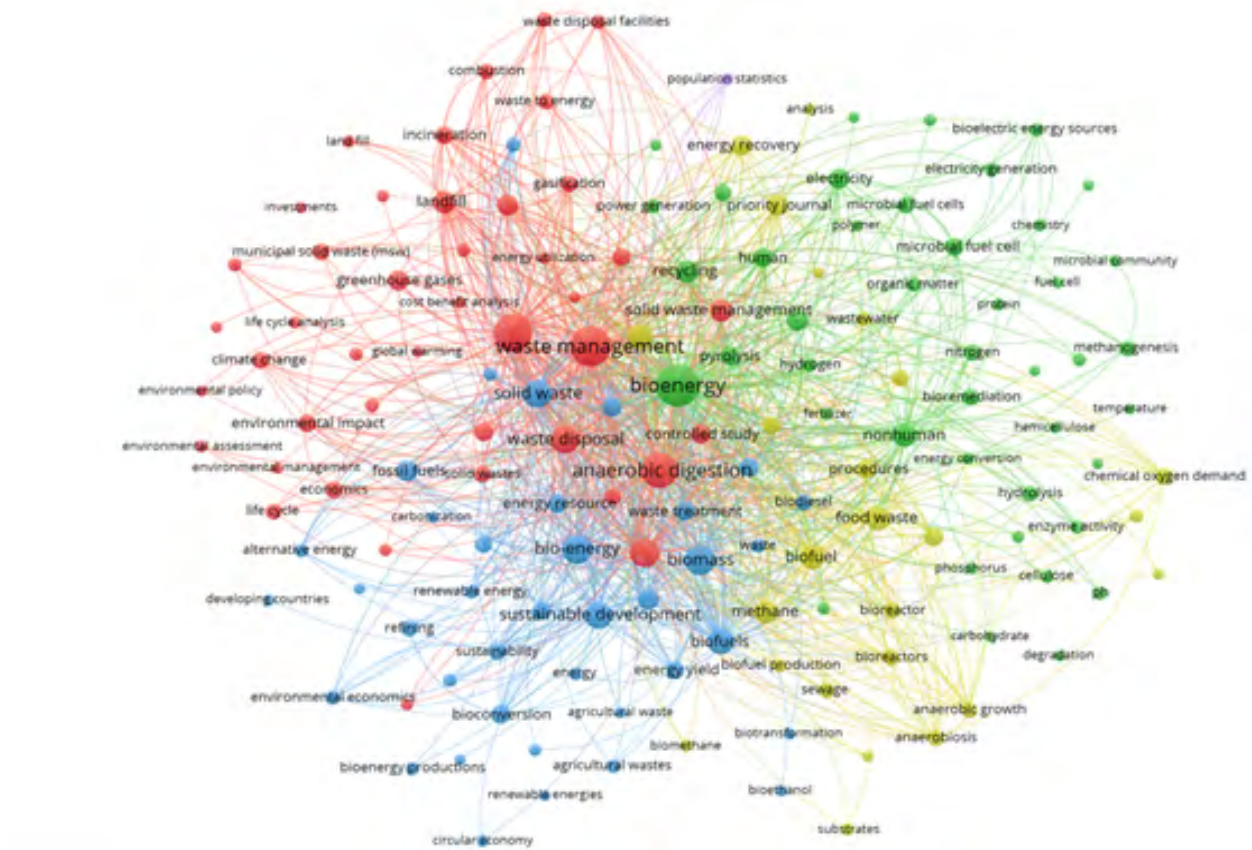
Figura 2. *Tipo de investigaciones presentes en los documentos revisados*



Nota. Elaboración propia.

La Figura 2 muestra los grupos temáticos que resultaron del análisis de cada documento examinado sobre las estrategias o técnicas utilizadas en la generación a través del manejo de RSU. Fueron identificados cuatro grandes grupos: gestión de residuos, bioenergía, eliminación de residuos y biomasa. En cuanto al análisis de las palabras clave, se observa la bioenergía (77 ocurrencias); de este término se desprende la gestión de residuos (62 ocurrencias), residuos sólidos municipales (55 ocurrencias) y, finalmente, biomasa (35 ocurrencias).

Figura 3. Mapa bibliográfico de coocurrencia de palabras clave



Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, se observaron 19 documentos que explicaban el manejo y tratamiento de residuos sólidos urbanos (Montiel-Bohórquez & Pérez, 2019; Alidoosti *et al.*, 2021; Indrawan *et al.*, 2020; Tsui & Wong, 2019; Sosa, 2022; Gadaleta *et al.*, 2022; Kohansal *et al.*, 2021, entre otros). Los siete restantes estuvieron enfocados en las alternativas bioenergéticas y la bioenergía (Hameed *et al.*, 2021; Blanco, 2021; Ayodele *et al.*, 2019; Ibbett *et al.*, 2020, entre otros). Es importante destacar que los 26 documentos revisados integran los términos de los cuatro grupos temáticos observados en la Figura 13, es decir, en el total de artículos fueron abordadas las estrategias utilizadas en el tratamiento de RSU para conseguir bioenergía.

En función de ello, entre las técnicas planteadas para la generación de energía distribuida se encuentra el uso de fuentes neutras en CO₂, como la gasificación de biomasa y desechos sólidos urbanos (RSU), estas son bastante úti-

les para que la demanda mundial de energía sea satisfecha de manera sostenible (Indrawan *et al.*, 2020). De igual forma, el procesamiento anaeróbico de RSU junto a la generación de metano y biogás representa una alternativa de fuentes de energía sostenibles. Comparándose con otras tecnologías para el manejo de RSU, aspectos económicos, el ahorro de energía y los beneficios ecológicos, el procesamiento anaeróbico ofrece una excelente opción (Yaashika *et al.*, 2020; Franca & Bassin, 2020).

Para Yaashika *et al.* (2020), el procesamiento anaeróbico es una técnica bastante ideal para el manejo de los RSU que contienen alto contenido de humedad, ello con el propósito de conseguir energía térmica y tecnología más limpia. En la Figura 13 se presenta de forma gráfica el proceso por el cual pasa un procesamiento anaeróbico, y el cual comienza con el manejo de los RSM (recolección, separación, transporte y el tratamiento de orgánicos e inorgánicos). Posteriormente, son expuestos a un proceso termoquímico, físico-químico y bioquímico; en este último se genera la digestión anaeróbica que, junto a los dos procesos anteriores, genera el biocombustible, biogás y biofertilizante, entre otros.

De igual manera, se han planteado y puesto en práctica procesos productivos en los cuales son utilizadas diferentes tecnologías a nivel mundial con el fin de generar energía limpia y asequible; entre ellos se encuentran los siguientes: bioetano, el calor industrial, biogás, biohidrógeno, carbón vegetal y pellets (Sosa-Cabrera, 2020). Asimismo, a nivel de Latinoamérica, específicamente en Nicaragua, se aplicó un proyecto gasificador de 300 KW realizado con residuos agrícolas con el propósito de generar electricidad. Este proyecto fue rentable a nivel financiero y económico. En su aplicación, se logró identificar y cuantificar “los beneficios sociales que generaría el proyecto en su fase de operación” (Blanco, 2021, p. 8). Se determinó de acuerdo a los supuestos considerados que “la actividad de generación de electricidad usando gasificación de residuos agrícolas es rentable integralmente” (Blanco, 2021, p. 9).

Otra de las alternativas bioenergéticas que pudo evidenciarse en la revisión realizada es la referida al aprovechamiento del gas hidrógeno (H₂), el cual es visto como el portador de energía del futuro debido a su alto contenido energético, pues es capaz de reemplazar los combustibles fósiles en la generación de energía y el transporte sin emisiones contaminantes tóxicas al momento en que es producido de fuentes renovables. Cuando este gas sirve como insumo para una pila de combustible, puede generar electricidad. De igual manera, puede usarse directamente en motores de combustión interna o como combustible para vehículos (Ayodele *et al.*, 2019; Paniagua-Gutiérrez *et al.*, 2022; Indrawan *et al.*, 2020).

La tecnología de pirólisis, igualmente, se constituye en una excelente opción para generar biocombustible, esto aprovechando la densidad energética de los materiales aplicándoles ciertos procesos para transformarlos. El pirólisis de biomasa que procede de la industria alimentaria da como resultado “mayor cantidad de bioaceite con alto contenido en ácidos grasos y compuestos fenólicos” (Sánchez-Hervas *et al.*, 2023, p. 53). Además, debido a sus rasgos físico-químicos, los residuos de sólidos urbanos procedentes de plantas de tratamiento originan biocarbonizado como producto pirolítico mayoritario. De allí que los RSU resultan ser un buen material para ser aprovechado en el proceso de pirólisis (Sánchez-Hervas *et al.*, 2023; Mejía & Upegui, 2020; Hasan *et al.*, 2021).

En relación con la tecnología de pirólisis, Hasan *et al.* (2021) establecieron que la calidad del biocarbón que se produce a partir de los RSU, utilizando este proceso, puede ser mejorado realizando pirólisis a temperaturas más altas, esto en lo concerniente a la obtención y aprovechamiento del biocarbón.

4.5. Conclusiones

La responsabilidad social empresarial es importante en la gestión porque es un instrumento que permite instaurar nuevas prácticas éticas y sostenibles, y estrategias enfocadas en la innovación y en una moderna gestión institucional

para generar una mayor productividad, competitividad y fidelización de los consumidores. Asimismo, la RSE tiene una gran relevancia, debido a que es un recurso de ayuda para modificar los procesos y resolver los del mercado, con lo que una empresa puede mantener su posición estratégica, cumplir con las demandas de los clientes, cumplir los objetivos y mejorar el desempeño de los trabajadores, considerando el equilibrio entre el medioambiente (conservación de los ecosistemas) y la sociedad.

A nivel mundial, diariamente son generadas grandes cantidades de residuos sólidos, lo que representa un problema bastante grave para las personas y para el medioambiente. Esta realidad ha llevado a los estados a crear mecanismos de aprovechamiento de los RSU, mediante los cuales se trata de tomarlos como una alternativa para generar bioenergía. Así, la revisión realizada permitió mostrar la importancia que, en la actualidad, reviste un tratamiento adecuado de los RSU para la generación de bioenergía; además, representa un importante aporte para los estudios realizados en torno a esta problemática, que se evidencia a nivel mundial y que afecta a la población en su totalidad.

Al utilizarse métodos tradicionales —como es el caso de los vertederos o rellenos sanitarios— para la disposición de residuos, no es posible aprovechar los materiales que los componen. Esto ha llevado a buscar e implementar alternativas tecnológicas efectivas, pues la gestión de RSU implementada en diferentes industrias ha mostrado grandes debilidades que, por el acelerado crecimiento poblacional y el incremento de residuos sólidos, sugieren que si no se realizan cambios rápidos y efectivos la situación tenderá a empeorar.

Según la revisión, el manejo de los residuos sólidos municipales y el desarrollo sostenible se encuentran íntimamente vinculados, lo cual es razonable si se considera que las políticas gubernamentales son referentes regulatorios para las actividades relacionadas con la gestión de residuos y la implementación de tecnologías que permiten aprovechar tales residuos para generar bioe-

nergía. Por tanto, se requieren políticas públicas de promoción e implementación de distintos tipos de tecnologías capaces de generar bioenergía para que las empresas conozcan los beneficios que aportan y las adopten.

Finalmente, resulta importante señalar que en los diferentes procesos analizados para tratar residuos sólidos destaca el biológico, mediante el cual es generado el biogás; esto ocurre mediante la digestión anaerobia en rellenos sanitarios; lo mismo sucede en las zonas orgánicas de RSU, donde son usados biodigestores y biorreactores, entre otros. Entre las técnicas utilizadas para el tratamiento y manejo de dichos residuos se encuentra la incineración, que representa una buena opción para su eliminación; esto porque ayuda a minimizar su volumen hasta en un 90 %. Además, existen otras tecnologías de conversión termoquímica (pirólisis y gasificación), y aquellas basadas en el plasma, con las cuales se consigue tratar los residuos para obtener energía eléctrica o calor, entre otros productos.

CAPÍTULO V

LA BIOENERGÍA EN TERRITORIO LATINOAMERICANO

Los territorios que conforman el espacio latinoamericano se caracterizan por su increíble variedad de climas que lo convierten en una fuente natural de recursos petroleros, mineros y gas. Sin embargo, ante la creciente oposición de la sociedad civil por los efectos nocivos que propicia la constante extracción, transformación y consumo del combustible fósil, la región tiene la oportunidad de producir biomasa a gran escala y dar comienzo a un modelo energético más justo, beneficioso y empático con la naturaleza. Al respecto, los distintos gobiernos de Centroamérica y Sudamérica vienen desarrollando proyectos energéticos sostenibles basados en el uso eficiente y responsable de matrices renovables como la elaboración del biocombustible. Pero este avance tecnológico ha significado tropiezos de orden político ante la falta de regulaciones integrales en costos, demandas, producción y demás.

La posibilidad de ampliar la capacidad energética en favor de los planes socioeconómicos de la región pasa por generar la demanda energética, procurando como paso inicial marcar una dirección a través de un objetivo de alto nivel para determinado sector. Esto permitirá reducir el riesgo de financiamiento, al definir con claridad las estrategias secuenciales en el desarrollo del sistema energético. Es fundamental, además, establecer los regímenes de tarificación e intensidad del carbono para promover el consumo de biocombustibles en el ámbito del transporte, por ejemplo, aplicando medidas fiscales atractivas, cer-

tificaciones para iniciativas de infraestructuras de repostaje y almacenamiento, entre otros más. Es así que, para propiciar un mercado competitivo y en franco crecimiento, es preciso incorporar mecanismos de apoyo equilibrados con políticas de demanda, producción y consumo, que vaya acorde con la reducción del pico de carbono global de hoy.

5.1. Panorama bioenergético en América Latina y el Caribe

En medio del debate sobre las obligaciones para descarbonizar el hábitat, y tomar medidas que garanticen un suministro energético sostenible, los esfuerzos de los gobiernos parecen dirigirse hacia el desarrollo de tecnologías que se sirvan de la materia orgánica degradada en rellenos sanitarios mal gestionados. Es así como en un escenario de mayor atención al cambio climático, y la caída en los costes de la energía renovable, se vislumbra el enorme potencial de América Latina y el Caribe respecto de un futuro energético ecológico, que privilegie su propio desarrollo mediante la diversificación de fuentes. Tal cual menciona Jones (2022), la vasta geografía de la región con abundantes recursos naturales le prodiga una capacidad de energía renovable que superó los 310 GW en 2022, lo cual remite a un crecimiento de más del 80 % en comparación con el 2010.

El desafío de reducir a cero las emisiones netas en las próximas dos décadas, coloca a la zona americana en un lugar privilegiado durante la transición energética mundial. No en vano cuenta con una de las redes energéticas más limpias del planeta, que la convierte en uno de los mercados de fuentes alternativas más dinámicos, albergando más de una cuarta parte de la energía primaria proveniente de los renovables, es decir, el doble del promedio a nivel global (ONU Habitat, 2024). De esta forma, Latinoamérica tiene la posibilidad de asumir su propia transformación a través del desarrollo de matrices energéticas más limpias y eficientes, principalmente de generación eólica y solar, que le permitirán atraer nuevas inversiones y cumplir con los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París para reducir la emisión de los gases contaminantes.

Apoyarse en el paradigma de una bioeconomía circular e impulsar su desarrollo regional, marcaría el despegue definitivo de los sistemas financieros locales. Los pronósticos sobre la generación de biomasa en América Latina representan entre 17 % y 26% de la oferta mundial de energía para el 2050, ubicándose como líder del segmento (Razo *et al.*, citados en Vargas-García *et al.*, 2021). La sorprendente megadiversidad de países ubicados en la cuenca andino-amazónica y Mesoamérica, no solo facilita una transición sostenible y sin complicaciones hacia la energía limpia; también permite que naciones como Perú y Chile puedan cumplir con los nuevos compromisos de duplicar la eficiencia energética hasta en un 4 % anual con miras al 2030, reducir el uso de la energía con base en carbón, y concluir con los financiamientos para nuevas centrales eléctricas de carbón (Bocca, 2023).

En los últimos años, el mercado latinoamericano se ha visto beneficiado con una notable atención de la administración pública y los privados por conseguir una matriz más limpia a partir de impulsar un *mix* energético más viable y empático con la naturaleza. Sujetas a esa convicción, las subastas de energía en Argentina, Brasil, México, Chile y Perú vienen incrementando la cuota de energía eólica y solar en sus territorios. En cuanto a la demanda hidroeléctrica, existen mercados con recursos geotérmicos importantes como lo es Brasil, pionero en bioenergía, con metas claras respecto a la diversificación del sistema eléctrico y la necesidad de un marco normativo que promueva su avance. Igualmente, el hidrógeno verde se ha posicionado en Chile y Colombia como una alternativa prometedora, para lo cual se han definido lineamientos que aporten en su rápida inclusión al sistema energético.

Todas estas iniciativas, cuentan con el apoyo del capital local, inversiones favorables de los bancos de desarrollo y una estratégica distribución del riesgo entre los sectores público y privado. Entre el 2010 y 2015, por ejemplo, se hizo una inversión cercana a los 120 mil millones de dólares en la financiación de proyectos para generación de energía renovable en la región centro y sur (IRENA, 2019). El auge de fuentes sostenibles supone un amplio dominio del sector

energético en América Latina hasta 2050, en especial la eólica y solar, por las tres décadas posteriores, con un almacenamiento que cubrirá el 80 % del total de inversiones, es decir, alrededor de \$459 mil millones (Moore & Henbest, 2020). Si bien, las regulaciones para su depósito sostenible aún resultan incipientes, es preciso continuar insistiendo en desarrollar una red energética verde y gestionable.

5.2. Amenazas al desarrollo de proyectos bioenergéticos en la región

El debate sobre los efectos del cambio climático, coloca a la minería nuevamente bajo la lupa debido a sus insumos, elementos clave en la transición energética para descarbonizar los procesos de electrificación, movilidad eléctrica o la digitalización. Así pues, minerales como el zinc, litio, cobre, hierro, aluminio, níquel, entre otros, se vuelven indispensables para la fabricación de aerogeneradores, baterías recargables y demás, imprescindibles en las industrias de la energía renovable, transporte o construcción. En ese contexto, América Latina y el Caribe asumen un papel decisivo en el suministro de estos materiales a razón de sus yacimientos abundantes de alta calidad y su experiencia en actividades extractivas. Ahora que el futuro del sistema energético mundial apunta hacia una mayor participación de la región, es preciso aprovechar la oportunidad para liderar cualquier emprendimiento.

Sin embargo, para responder al compromiso de limitar el calentamiento a 1,5 °C a través de fuentes limpias, es obligatorio descartar la búsqueda y explotación de nuevos depósitos de petróleo o gas, ni la ejecución de nuevas centrales eléctricas de carbón. Esta brecha de producción, resulta difícil de alcanzar debido a la aún enorme dependencia de la región a la exportación de materias primas; y que ha promovido en algunas naciones considerar el incremento anual de la producción del combustible fósil de hasta un 2 %, dos veces más para el 2030 (UNEP, 2019). La disyuntiva de apostar por un modelo energético sostenible o continuar sujetos a la demanda global del petróleo, gas

natural y similares supondría la renuncia a ingresos fiscales importantes para países como Ecuador, Trinidad y Tobago, y México, con retribuciones del 8,0 %, 6,6 % y 5,4 % respectivamente (OECD, 2020).

Se asiste a un momento complejo, en el que Latinoamérica debe concretar la posibilidad de abandonar la explotación del combustible fósil. Actualmente, la tendencia de adaptarse a los nuevos usos que propone la energía renovable ha permitido la reducción de costos (IRENA, 2020), provocando que cerca del 90 % del suministro de la electricidad mundial tenga su origen en las fuentes alternativas (EDIE, 2020); una ruta que parecen seguir las ventas de vehículos eléctricos, cuyo aumento habla de una transformación energética muy cercana. Aunque el panorama parece prometedor, la inestabilidad en los precios del crudo y la urgente necesidad de reestablecer las economías dependientes en la región, obligan a destinar paquetes de financiamiento relevantes, por encima de otros ámbitos estratégicos; medidas que se alejan cada vez más de los objetivos de emisiones netas cero en 2050.

A medida que aumente la presión por limitar el calentamiento mundial a 1,5 °C, existe un presupuesto de carbono restante de unas 500 GtCO₂ equivalentes a más de una década de emisiones actuales para un 50 % de posibilidades de mantenerse dentro del rango objetivo (United Nations Environment Programme [UNEP], 2022). Acelerar los esfuerzos por descarbonizar el medioambiente, conduciría a una disminución drástica de la demanda del combustible fósil, desestimando las reservas bajo tierra y dejándolas en el olvido. Ocurrido ello, se convertirían irremediablemente en activos devaluados o en proceso de para de sus funciones, inclusive antes de concluir con su vida útil estimada, lo cual supondría un importante capital perdido, el gran costo social por inhabilitar su cadena de valor y la pérdida de ingresos para los países exportadores o dependientes de ingresos fiscales procedentes del combustible fósil.

La producción de energía renovable ha crecido sin alteraciones desde el 2000, y América Latina ha seguido el mismo camino albergando mercados y

proyectos de alta proyección para dinamizar el segmento de fuentes alternativas. Es así como las naciones de Uruguay y Costa Rica generaban casi el 100 % de electricidad a partir de matrices limpias, mientras que, los países de México, Chile y Brasil aparecían en el *top ten* de mayor inversión para desarrollar una red energética no convencional durante el 2015 (REN21, 2019). Aunque los estimados son positivos, las cifras hablan de un crecimiento del consumo mundial del 75 % hacia el 2027 y aumentos hasta el 45 % para la región latinoamericana (IEA, 2022); este progreso no ha estado exento de serias denuncias a causa de los impactos ambientales y sociales que generan las iniciativas de energía renovable a gran escala.

Al 2021, la cantidad de empresas dedicadas a las energías renovables en América Latina se distribuían en 63 % solo hidroeléctricas, el rubro de la eólica incluía 49 compañías que representaban el 31 %, y la solar llegaba al 6 % (Hudlet & Hodgkins, 2021). De estos tres sectores, los dos primeros presentaron el mayor número de casos por abusos y violaciones a los derechos humanos vinculados a los derechos a la tierra y territorio, amenazas contra los defensores de derechos humanos, ataques a los derechos indígenas, a disfrutar de un ambiente sano y el derecho de consentimiento previo, libre e informado. Muchas de estas denuncias se concentran predominantemente en Centroamérica, seguidas por América del Sur y México; lugares donde los responsables del sector energético renovable vienen replicando patrones de violencia similares a los de las energías fósiles.

Los datos recogidos muestran la necesidad de una transición energética justa, apoyada en modelos alternativos adaptados al contexto de cada región, provistos de regulaciones muy atentas a la calidad de las evaluaciones de impacto general, en el cual se garantice que los pueblos involucrados tengan el derecho a decir no. Asimismo, la creación de mecanismos que promuevan el reconocimiento e inclusión de quienes son tradicionalmente excluidos deben estar orientados al acceso a la justicia y a un juicio que permita insistir en la mejora y cumplimiento de compromisos y planes codificados en una debida

diligencia ambiental y de derechos humanos. En paralelo, es crucial eliminar toda brecha y vacío de aplicación que puedan promover severos abusos y una injusta distribución de beneficios, procurando soluciones ajustadas a la escala, propiedad y el diseño de los proyectos energéticos.

5.3. La fotosíntesis artificial: la hoja biónica y los biopaneles solares

Hoy, América Latina se ha convertido en una piedra angular de diversos proyectos sobre energía no convencional destinados a la ampliación de la capacidad mundial. Su territorio, vasto en recursos eólicos y solares, le confiere el potencial suficiente para ser líderes no solo durante la transición hacia un modelo bioeconómico justo, sino también en el alcance de los desafíos por la descarbonización del ecosistema. Al respecto, países como México, Brasil, Chile y Colombia ocupan un espacio privilegiado debido al funcionamiento de sus parques eólicos y solares a gran escala, con una capacidad colectiva superior a los 57 GW (Bauer *et al.*, 2023). Con ese objetivo, de enfrentar el cambio climático con nuevas formas de producción de energía, diferentes análisis demuestran la importancia de avanzar en las técnicas de ingeniería genética con miras a incrementar la búsqueda de matrices limpias.

En años recientes, se han fortalecido las investigaciones sobre la influencia de la luz solar en ámbitos como el desarrollo sostenible, el energético, la medicina, las comunicaciones y la generación de alimentos. Es así que, los trabajos sobre tecnología solar se centran en el estudio de la fotosíntesis para diseñar procesos más eficientes ante los inconvenientes naturales que presentan ciertos proyectos en este rubro. La inexistencia de estrategias para vender la energía del sol por bloques horarios, por ejemplo, echa abajo la pretensión de querer vender electricidad por doce horas en el mercado peruano, tomando en cuenta que esta energía solo se produce en el día (Gamio, 2023). Además, las plantas transforman el CO₂ en biomasa usando el 1 % de la luz; por tanto, se requieren grandes extensiones de cultivos para capturar la energía solar necesaria

y generar los alimentos.

Uno de estos estudios realizado en la Universidad de Harvard, diseñó una hoja biónica hecha de láminas de metal y compuestos químicos que replica el proceso de la fotosíntesis a modo de catalizador, captura la energía del sol y divide las moléculas de agua mediante bacterias que se alimentan de hidrógeno que son capaces de sintetizar la biomasa. Si bien este mecanismo puede fabricar un combustible menos contaminante, usando a la bacteria *Xanthobacter* es posible almacenar el hidrógeno como bioplástico y, ya depositado en el suelo, lo junta con el nitrógeno del aire para llevar el ciclo de fijación hacia la generación de amoníaco que fertiliza los cultivos (Gobierno de México, 2023). De igual forma, en la Universidad de California hallaron la manera de producir comida con un sistema híbrido de fotosíntesis artificial sin luz solar para convertir el dióxido de carbono en moléculas y generar productos útiles que optimicen el acetato y sirva de nutriente de ciertos vegetales.

Aunque América Latina cuenta con una de las redes eléctricas menos intensivas en CO₂, existen diferentes gobiernos en esta parte del continente, entre ellos Argentina, México y Brasil, que continúan financiando infraestructuras para la explotación de los combustibles fósiles, desconociendo sus responsabilidades sobre las emisiones de gases contaminantes. Ello afecta seriamente los objetivos nacionales ajustados a la hoja de ruta establecida por la Agencia Internacional de Energías Renovables - IRENA (2022), para asegurar el calentamiento del planeta en 1,5 °C hacia el 2050; además, se corre el riesgo de convertirse en activos poco rentables debido a las fluctuaciones de un mercado incierto, e inclusive, de mantenerse inoperativos a causa de los altos costos iniciales. A pesar de ello, se aspira a impulsar proyectos eólicos y solares a gran escala basados en la capacidad energética de cada país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdulyekeen, K. A., Umar, A. A., Patah, M. F. A., & Daud, W. M. A. W. (2021). Torrefaction of biomass: Production of enhanced solid biofuel from municipal solid waste and other types of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111436. [10.1016/j.rser.2021.111436](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111436)

Abellán, E. (2018). Modelos de prestación de servicios y plan director municipal. En P. Tello, D. Campani y D. R. Sarafian (eds.), *Gestión integral de residuos sólidos urbanos* (pp. 36-46). AIDIS.

Agencia Internacional de Energías Renovables - IRENA (17 de noviembre de 2022). *World Energy Outlook 2022. Resumen ejecutivo*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary?language=es>

Agencia Internacional de Energías Renovables. (21 de marzo de 2023). *Las renovables registran un crecimiento récord pese a la crisis energética*. <https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Mar/Record-Growth-in-Renewables-Achieved-Despite-Energy-Crisis-ES>

Akdag, S., & Hakan, Y. (2020). Toward a sustainable mitigation approach of energy efficiency to greenhouse gas emissions in the European countries. *Heliyon*, 6(3). doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03396

Alidoosti, Z., Ahmad, S., Govindan, K., Pishvae, M. S., Mostafaeipour, A., & Hossain, A. K. (2021). Social sustainability of treatment technologies for bioenergy generation from the municipal solid waste using best worst method. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125592. [10.1016/j.jclepro.2020.125592](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125592)

Almeida, M., & Díaz, C. (2020). Economía circular, una estrategia para el desarrollo sostenible. Avances en Ecuador. *Estudios de la Gestión: International Journal of Management*, (8), 34-56. <https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.10>

Alvarado, T. L., & Rangel, S. A. (2021). Revisión de estrategias sostenibles para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las organizaciones. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 7(2), 76-94. <https://doi.org/10.23850/24220582.3141>

Antúnez, A., Matos, I., & Álvarez, R. (2020). La Minería Urbana. Un análisis desde el ordenamiento jurídico en Cuba. Una Apuesta al Desarrollo Sostenible desde la Economía Circular. *Ciencias Sociales y Económicas*, 4(1), 124-153. <https://doi.org/10.18779/csye.v4i1.292>

Antúnez, J. (29 de noviembre de 2023). *Los biocombustibles de segunda generación, claves para acelerar la transición energética*. La Vanguardia. <https://www.lavanguardia.com/economia/20231129/9400499/biocombustibles-segunda-generacion-claves-para-acelerar-la-transicion-energetica-brl.html>

Ardolino, F & Arena, U. (2019). Biowaste-to-Biomethane: An LCA study on biogas and syngas roads. *Waste Management*, 87, 441-453 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.030>

Ariza, A., Sánchez, V., Bahamón, A., Díaz, C., & Pasqualino, J. (2020). Community diagnosis for integrated solid waste management. Case study: Barrio Fredonia, Cartagena. *Producción + Limpia*, 15(2), 153-174. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n2a10>

ASECA. (12 de julio de 2022). *La problemática de los rellenos sanitarios*. <https://aseca.com/la-problematica-de-los-rellenos-sanitarios/>

Asociación Española de la Biomasa. (2023). *Pellets 2023. Informe estadístico sobre producción y consumo de pellets en España* [Archivo PDF]. https://www.avebiom.org/sites/default/files/observatorio_biomasa/Informe-estadistico-Pellets-2023-AVEBIOM.pdf

Ayala-Mendivil, N., & Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y Bosques*, 24(especial). 10.21829/myb.2018.2401877

Ayeleru, O., Okonta, F. N. & Ntuli, F. (2020). Cost benefit analysis of a municipal solid waste recycling facility in Soweto, South Africa. *Waste Manag*, 134, 263-269. 10.1016/j.wasman.2021.08.001

Ayodele, T. R., Alao, M. A., Ogunjuyigbe, A., & Munda, J. L. (2019). Electricity generation prospective of hydrogen derived from biogas using food waste in south-western Nigeria. *Biomass and Bioenergy*, 127, 105291. 10.1016/j.biom-bioe.2019.105291

Banco Mundial. (20 de septiembre de 2018). *Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>

Barrena, M., Cubas, F., Gosgot, W., Ordinola, C. & Rascón, J. (2019). Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 725-734. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26214>

Bauer, S., O'Malia, K., Prasad, S., Clark, G. & Behrsin, I. (2023). *Una carrera hacia la cima: América Latina 2023*. Global Energy Monitor. <https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2023/03/GEM-LATAM-report-Spanish.pdf>

Barrera Valdivia, I., Hernández García, G. & Mendoza Méndez, C. E. (2022). Los rellenos sanitarios, una solución paliativa a la problemática de residuos sólidos en Zamora, Michoacán, México. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 3(2), 1111-1126. <https://doi.org/10.56712/latam.v3i2.170>

Bartra, J. & Delgado, J. (2020). Gestión de residuos sólidos urbanos y su impacto medioambiental. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 4(2), 993-1008. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v4i2.135

BBVA (15 de julio de 2024). ¿Qué es la biomasa y para qué sirve? El aprovechamiento de lo orgánico. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-biomasa-el-aprovechamiento-de-lo-organico/>

Bernat, K., Zaborowska, M., Wojnowska-Baryła, I., & Piotrowicz, B. (2021). Leachate after aerobic stabilization of municipal solid waste supplemented by waste glycerine from saponification to improve biogas production during co-digestion. *Biomass and Bioenergy*, 144, 105908. [10.1016/j.biombioe.2020.105908](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105908)

Blanco, N. (2021). Generación de energía eléctrica en sistemas de generación distribuida de pequeña escala usando bioenergía en Nicaragua. *Revista Fuentes, El Reventón Energético*, 19(1), 21-31. <https://doi.org/10.18273/revfue.v19n1-2021003>

Blanco, N. V. (2023). Evaluación ex-ante financiera, socioeconómica y ambiental de un gasificador de 300 kw para generar electricidad con residuos agrícolas en León, Nicaragua. *Nexo Revista Científica*, 36(02), 01-11. <https://doi.org/10.5377/nexo.v36i02.15992>

Break Free From Plastic (2023). *The brand audit 2023 report*. <https://brandaudit.breakfreefromplastic.org/brand-audit-2023/>

Bocca, R. (23 de noviembre de 2023). *América Latina y el Caribe tienen un “notable potencial energético”, y otras noticias sobre energía*. World Economic Forum. <https://es.weforum.org/agenda/2023/11/latinoamerica-y-el-caribe-tienen-un-notable-potencial-energetico-y-otras-noticias-sobre-energia/>

Callihuanca, G. (5 de julio del 2021). *Desafíos de la gestión de residuos sólidos en el Perú*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/desaf%C3%ADos-de-la-gesti%C3%B3n-residuos-s%C3%B3lidos-en-el-per%C3%BA-sustainable-club/>

Carvajal, H., García, M. & Teijeiro, M. (2021). Evolution of environmental policy in waste management. *University and Society Journal*, 13(2), 265-275. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000200265&lng=es&tlng=en

Carvajal-Romero, H., Teijeiro-Álvarez, M. & García-Álvarez, M.T. (2022). Análisis de la gestión de los residuos sólidos urbanos en Europa. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(1), 402-415. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202022000100402&lng=es&tlng=es.

Castelao, M. (2020). Configuración de la industria de bioenergía eléctrica y térmica en Argentina. H-Industria. *Revista de Historia de la Industria y el Desarrollo en América Latina*, (27), 55-78. <https://ojs.econ.uba.ar/index.php/H-ind/article/view/1960>

Castro-Rivera, R., Solís-Oba, M. M., Chicatto-Gasperín, V. & Solís-Oba, A. (2020). Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 529-539. <https://doi.org/10.20937/rica.53545>

Cier Galápagos (26 de febrero de 2019). *La bioenergía: la gran olvidada de las energías renovables*. <https://ciergalapagos.wordpress.com/2019/02/26/la-bioenergía-la-gran-olvidada-de-las-energías-renovables/>

Consejo Directivo Nacional. (2024). Plan de manejo de residuos sólidos del OSCE. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6331158/5562590-anejo-plan-de-manejo-de-residuos-solidos-del-osce.pdf?v=1715372515>

Coral Group (18 de enero de 2024). *Plantas de biomasa (WtE): beneficios, riesgos y prevención*. <https://www.coral.eu/es/insight/impianti-a-biomassa-wt-e-vantaggi-rischi-e-prevenzione/#:~:text=eficazmente%20estos%20riesgos.-,Qu%C3%A9%20son%20las%20plantas%20de%20biomasa,en%20las%20pr%C3%B3ximas%20tres%20d%C3%A9cadas.>

Cordero, A. (30 de agosto de 2023). *Producción de biogás a nivel de granja mediante codigestión: ejemplo de viabilidad económica y de sostenibilidad*. 3tres3. https://www.3tres3.com/latam/articulos/produccion-de-biogas-mediante-codigestion-a-nivel-de-granja_15731/

Correal, M., Rihm, A., & Zambrano, M. (2021). *De desechos a recursos: gestión de residuos sólidos para el desarrollo*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://blogs.iadb.org/agua/es/desechos-a-recursos-gestion-residuos-solidos/>

Cortés-Sánchez, M. D., Gata-Montero, E., Pipió-Ternero, A., Rodríguez-Rivas, A. & Sánchez-Santos, J. (2019). Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *MoleQla, Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 35, 01-51. <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero35/Numero-35.pdf>

Daly, A. & Cognuck González, S. (2021). *Calidad del aire: ¡Es el momento de actuar!* Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). <https://www.unicef.org/lac/informes/calidad-del-aire-es-el-momento-de-actuar>

De Gregorio, M. (2020). *Biomasa en España. Generación de valor añadido y análisis prospectivo* [Archivo PDF]. Fundación de Estudios de Economía Aplicada: FEDEA. <https://documentos.fedea.net/pubs/eee/eee2020-01.pdf>

De la Rosa, D., Giménez, P., & De la Calle, C. (2019). Educación para el desarrollo sostenible: el papel de la universidad en la agenda 2030: Transformación y diseño de nuevos entornos de aprendizaje. *Revista Prisma Social*, (25), 179-202. <http://ddfv.ufv.es/handle/10641/1691>

Gobierno de Argentina. (2022). *Decreto 330/2022 de 2022 [con fuerza de ley]*. Régimen de Corte Obligatorio Transitorio Adicional de Biodiésel. 16 de junio de 2022. DECNU-2022-330-APN-PTE. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/decreto-330-2022-366627/texto>

Defensoría del Pueblo (2019). *Informe Defensorial N.º 181 - ¿Dónde va nuestra basura?* <https://www.gob.pe/institucion/defensoria/informes-publicaciones/1040893-informe-defensorial-n-181-donde-va-nuestra-basura>

Domínguez, R., León, M., Samaniego, J. & Sunkel, O. (2019). *Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad: 70 años del pensamiento de la CEPAL*. CEPAL-Naciones Unidas. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44785-recursos-naturales-medio-ambiente-sostenibilidad-70-anos-pensamiento-la-cepal>

Ecolana. (22 de junio de 2020). ¿Qué es un relleno sanitario? <https://ecolana.com.mx/ecomapa/relleno-sanitario.html>

Ecologistas en Acción. (22 de julio de 2021). *España sigue dependiendo de biocombustibles insostenibles*. <https://www.ecologistasenaccion.org/176559/espaa-sigue-dependiendo-de-biocombustibles-insostenibles/>

EDIE (11 de mayo de 2021). *Renewable energy to account for 90 % of new power expansion post-Covid-19*. <https://www.edie.net/iea-renewable-energy-to-account-for-90-of-new-power-expansion-post-covid-19/>

El País, (23 de mayo de 2023). *Combustibles renovables. Qué son y qué ventajas tienen*. <https://elpais.com/sociedad/repensemos/2023-05-23/combustibles-renovables-que-son-y-que-ventajas-tienen.html>

El Peruano. (28 de mayo de 2023). *Buen vivir: correcta separación de residuos orgánicos e inorgánicos permite un uso más adecuado*. <https://www.elperuano.pe/noticia/213887-buen-vivir-correcta-separacion-de-residuos-organicos-e-inorganicos-permite-un-uso-mas-adecuado>

ENDESA (2021). *Centrales de biomasa: infografía para conocer su funcionamiento*. <https://www.endesax.com/es/es/historias/2021/centrales-de-biomasa>

Eskander, Sh., & Fankhauser, S. (2020). Reduction in greenhouse gas emissions from national climate legislation. *Nature Climate Change*, 10(8), 750-756. doi.org/10.1038/s41558-020-0831-z

Fehrenbach, H., Bürck, S. & Wehrle, A. (2023). *The Carbon and Food Opportunity Costs of Biofuels in the EU27 plus the UK*. IFEU-Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg. <https://www.ifeu.de/publikation/the-carbon-and-food-opportunity-costs-of-biofuels-in-the-eu27-plus-the-uk>

Ferrão, C. C. & Moraes, J. (2021). Analysis of environmental risks and accidents at work in urban solid waste collection services. *Gestão & Produção*, 28(1), e4885. <https://doi.org/10.1590/1806-9649.2020v28e4885>

Fernández, A. (18 de septiembre de 2020). ¿Realmente los combustibles ecológicos son ecológicos? Greenpeace. <https://es.greenpeace.org/es/noticias/los-combustibles-ecologicos-son-ecologicos/>

Flowers, S. (2020). *Future energy-biodiesel. Cleaner fuel for aviation and road transport set for take-off*. Wood Mackenzie. <https://www.woodmac.com/blogs/the-edge/future-energy--biodiesel/>

Foster, S. & Elzinga, D. (s.f.). *El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible*. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>

Franca, L. S., & Bassin, J. P. (2020). The role of dry anaerobic digestion in the treatment of the organic fraction of municipal solid waste: A systematic review. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105866. doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105866

Gadaleta, G., De Gisi, S., Picuno, C., Heerenklage, J., Kuchta, K., Sorrentino, A., & Notarnicola, M. (2022). Energy recovery options for the management of cellulose-based bio-plastics and mixed municipal solid waste, *Biomass and Bioenergy*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106628>

GAIA (2021). *Los residuos plásticos han llegado a América Latina: tendencias y desafíos en la región*. <https://www.no-burn.org/es/resources/plastic-waste-has-arrived-in-latin-america-trends-and-challenges-in-the-region/>

Gamio, P. (22 de mayo de 2023). ¿Cuánto han avanzado y cuál es el potencial de las energías renovables en Perú? Forbes Perú. <https://forbes.pe/sostenibilidad/2023-05-22/que-retos-y-oportunidades-tienen-las-energias-renovables-en-peru>

García-Ceca, C. (16 de julio de 2024). *El Miteco prioriza el biogás y el hidrógeno renovable para descarbonizar el transporte de 2030*. <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/el-miteco-prioriza-el-biogas-y-el-20240716>

Gobierno de México (2023). *La luz solar, el recurso energético más grande para la producción de alimentos*. <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-luz-solar-el-recurso-energetico-mas-grande-para-la-produccion-de-alimentos>

Gonzales, A., Castillo, J. & Ivanova, A. (2019). Prácticas ambientales en empresas manufactureras de equipo de transporte en México. *Revista Venezolana de Gerencia*, 24(2), 210-222. <https://www.redalyc.org/journal/290/29063446011/html/>

Grasso, A. (16 de abril de 2023). *Cómo reciclar en América Latina: ¿sabes dónde acaba tu basura?* El País. <https://elpais.com/america-futura/2023-04-16/como-reciclar-en-america-latina-sabes-donde-acaba-tu-basura.html>

Greenwald, N., Suckling, K. F., Hartl, B. & Mehrhoff, L. (2019). Extinction and the U.S. endangered species Act. *PeerJ*, 7, e6803. 10.7717/peerj.6803

Hameed, Z., Aslam, M., Khan, Z., Maqsood, K., Atabani, A. E., Ghauri, M., ... Nizami, A. S. (2021). Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136. 10.1016/j.rser.2020.110375

Hasan, M. M., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N., & Jahirul, M. I. (2021). Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145. doi:10.1016/j.rser.2021.111073

Huamaní, C., Tudela, J. & Huamaní, A. (2020). Gestión de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca - Puno-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas-Journal of High Andean Research*, 22(1), 106-115. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572020000100106

Hochstrasser Castillo, N., De la Rosa Gómez, I., Borbón Morales, C. G. & Hernández Berriel, M. C. (2020). Retorno social de la inversión para gestionar los residuos sólidos urbanos de Metepec, México. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 8(22). <https://doi.org/10.22201/enesl.20079064e.2020.22.75478>

Hudlet, K. & Hodgkins, C. (2021). *(In)justicia energética en América Latina*. Business & Human Rights Resource Centre. https://media.business-humanrights.org/media/documents/reporte_RE_espanol04.08_BgB3kz3.pdf

Ibbett, R., Tucker, G., McKechnie, J., & Meng, F. (2020). Enzyme digestion of biofiber from mechanical heat treated municipal solid waste: Accessing kinetic and rheological design data using a pilot-scale high-solids mixer. *Biomass and Bioenergy*, 143. 10.1016/j.biombioe.2020.10581

Indrawan, N., Kumar, A., Moliere, M., Sallam, K. A., & Huhnke, R. L. (2020). Distributed power generation via gasification of biomass and municipal solid waste: A review. *Journal of the Energy Institute*, 93(6) 10.1016/j.joei.2020.07.001

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (s.f.). *Biomasa*. Gobierno de España. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biomasa>

Instituto Tecnológico del Plástico. (21 de septiembre de 2023). *Cómo se obtiene el biogás: energía renovable a partir de residuos orgánicos*. <https://www.aimplas.es/blog/como-se-obtiene-el-biogas-energia-renovable-a-partir-de-residuos-organicos/>

International Energy Agency. (2022). *Renewables 2022 Analysis and forecast to 2027* [Archivo PDF]. <https://doi.org/10.1787/25202774>

International Energy Agency. (2022). *World Energy Outlook 2022. An updated roadmap to Net Zero Emissions by 2050*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/an-updated-roadmap-to-net-zero-emissions-by-2050>

International Renewable Energy Agency. (30 de enero de 2019). Plan de acción regional: acelerando el despliegue de energía renovable en América Latina [Archivo PDF]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Regional-Group/Latin-America-and-the-Caribbean/IRENA_LatAm_plan_de_accion_2019_ES.PDF?rev=2396bbc160af4f159cd586282fca1fc9&hash=38CFE37D01F4B25BE5C023485822D77E#:~:text=Entre%202010%20y%202015%2C%20la,renovable%20m%C3%A1s%20grandes%20del%20mundo.

International Renewable Energy Agency. (junio de 2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>

International Renewable Energy Agency. (22 de septiembre de 2022). *Renewable energy jobs hit 12.7 million globally*. <https://www.irena.org/News/pressreleases/2022/Sep/Renewable-Energy-Jobs-Hit-12-7-Million-Globally>

Jumique, A. (24 de julio de 2023). *Clasificación de basura: qué son los desechos orgánicos e inorgánicos y sus ejemplos*. Prensa Libre. <https://www.prensalibre.com/vida/salud-y-familia/clasificacion-de-basura-que-son-los-desechos-organicos-e-inorganicos-y-sus-ejemplos/>

Jones, D. (30 de marzo de 2022). *Global Electricity Review 2022*. <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/#supporting-material>

Kätelhön, A., Meys, R., Deutz, S., Suh, S., & Bardow, A. (2019). Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(23), 11187-11194. <https://bit.ly/3uNvZbb>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Group. <https://hdl.handle.net/10986/30317>

Kohansal, K., Toor, S., Sharma, K., Chand, R., Rosendahl, L., & Pedersen, T. H. (2021). Hydrothermal liquefaction of pre-treated municipal solid waste (biopulp) with recirculation of concentrated aqueous phase. *Biomass and Bioenergy*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106032>

Kuo, G. (23 de mayo de 2019). *When Fossil Fuels Run Out, What Then?* Millennium Alliance for Humanity and the Biosphere-MAHB. <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/>

Laso, S., Marbán, J. M. & Ruiz, M. (2019). Diseño y validación de una escala para la medición de conciencia ambiental en los futuros maestros de primaria. *Revista de Curriculum y Formación del Profesorado*, 23(3), 297-316. <https://doi.org/10.30827/profesorado.v23i3.11181>

Lecaro-Zambrano, J. & Garzón-Montealegre, V. (2021). Energía eléctrica fotosintética: una alternativa económica y ecológica para los sectores rurales y urbanos del Cantón Machala, Provincia de El Oro. *Polo del Conocimiento*, 6(12), 670-685. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/18575>

Limache, M. (2021). Program to improve the level of citizen awareness of solid waste collection in the neighborhood of San Carlos, Huancayo. *Industrial Data*, 24(2), 193-216. <https://dx.doi.org/10.15381/idata.v24i2.19833>.

López-Valdepeña, M., Valle-Barbosa, M. A. & Fausto-Guerra, J. (2021). Condiciones laborales y riesgos para la salud en recolectores de basura. *Revista Colombiana de Salud Ocupacional*, 11(1). 10.18041/2322-634X/rcso.1.2021.5898

Manero, A. (2020). La política comercial común de la unión europea y el desarrollo sostenible. *Revista de Derecho Comunitario Europeo*, 66, 603-627. <https://doi.org/10.18042/cepc/rdce.66.10>

Manzanares, G. (2020). Desarrollo sostenible y políticas públicas: enfoque de la ONU y ecología política. *Revista Ciencia Jurídica y Política*, 73-87. <https://revistasnicaragua.cnu.edu.ni/index.php/revciejupol/article/view/7088>

Marahrens, M. (4 de noviembre de 2022). *Fueling our crisis* [Archivo PDF]. Transport & Environment. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/Soy_Study_TE_2022_final_embargoed_Friday_4_Nov-1.pdf

MAPFRE Global Risks (10 de agosto de 2021). *Energías renovables, tendencias en Latinoamérica*. <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/energias-renovables-tendencias-en-latinoamerica/>

Martínez, J. H., Romero, S., Ramasco, J. J. & Estrada, E: (2022). The world-wide waste web. *Nature Communication*, 13, 1615. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28810-x>

Martín, C. (3 de abril de 2023). *La fotosíntesis abre la puerta a una nueva forma de energía renovable*. La Razón. https://www.larazon.es/ciencia/fotosintesis-abre-puerta-nueva-forma-energia-renovable_20230403642a06b0f7cb-370001daf9fd.html

McKinsey & Company. (18 de octubre de 2023). *Global energy perspective 2023*. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023>

- Mejía, S., & Upegui, S. (2021). El pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria. Una revisión. *Cuaderno Activa*, 13, 41-60. <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/728>.
- Mena, M. (2022). *Generación de residuos. Un mundo de residuos*. Statista. <https://es.statista.com/grafico/27140/desechos-solidos-municipales-generados-per-capita-al-ano/>
- Merchán, E., Campozano, Y. & Figueroa, G. (2020). Technological waste management and its environmental impact. Interdisciplinary Refereed. Journal of Health Sciences. *Salud y Vida*, 4(7), 156-171. <http://dx.doi.org/10.35381/s.v.v4i7.665>
- Mi, Z., Dabo G., Zhu, L., Jingru, L., Viguié, V., Fromer, N., & Wang, Y. (2018). Cities: the core of climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 207, 582-589. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.034
- Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social de Paraguay. (2024). *Quema de basuras es perjudicial para la salud, advierte Ministerio*. <https://portal.mspbs.gov.py/quema-de-basuras-es-perjudicial-para-la-salud-advierte-ministerio/>
- Miño, A. (2022). *Biocombustibles - Biodigestores: modelo energético como política de Estado con vinculación universitaria*. En 3ras. Jornadas de Investigación (pp. 1012-1038). Universidad Nacional Arturo Jauretche. https://www.academia.edu/117029825/Las_lenguas_extranjeras_en_cuatro_municipios_del_conurbano_bonaerense_una_demanda_de_conocimiento_satisfecha_por_el_mercado
- Molina, M. & Zaldumbide, D. (2020). Economía circular como modelo económico en el contexto de la ciudad de Manta, Manabí, Ecuador. *Digital Publisher CEIT*, 5(5-1), 117-136. <https://doi.org/10.33386/593dp.2020.5-1.328>
- Mondal, S., Singh, S. & Gupta, H. (2023). Assessing enablers of green entrepreneurship in circular economy: An integrated approach. *Journal of Cleaner Production*, 388. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135999>
- Montiel-Bohórquez, N., & Pérez, J. (2019). Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas. *Información Tecnológica*, 30(1), 273-284. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000100273>

Moore, J. & Henbest, S. (2020). *New Energy Outlook 2020* [Archivo PDF]. BloombergNEF. https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/928908_NEO-2020-Executive-Summary.pdf

Morales, I. (27 de enero de 2022). *El futuro de la biomasa, un recurso renovable, rural y distribuido*. El Confidencial. https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2022-01-27/biomasa-fuente-energia-renovable-rural_3364870/

Moreno, K., Freire, G. & Caisa, D. (2021). Cadena de suministros verde: análisis estratégico de la gestión de residuos sólidos en Pelileo-Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales*, 27(3), 293-308. <https://www.redalyc.org/journal/280/28068276038/html/>

Mumtaz, H., Sobek, S., Werle, S., Sajdak, M., & Muzyka, R. (2023). Hydrothermal treatment of plastic waste in a circular economy perspective. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.100991>

Naciones Unidas (27 de mayo de 2022). *Energías renovables: energías para un futuro más seguro*. <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>

Naciones Unidas (30 de marzo de 2024). *Día Internacional de cero desechos*. <https://www.un.org/es/observances/zero-waste-day>

Naciones Unidas (4 de mayo de 2024). *Dominica, cada vez más cerca de la independencia energética gracias a las renovables*. <https://news.un.org/es/story/2024/05/1529376>

Najar, E., Alcedo, K., Vega, E., Ludeña, L., Jaurequi, P., & Contreras, R. (2022). Environmental management of urban solid waste in the district of Castilla, Piura. *Ciencia Latina. Revista Científica Multidisciplinar*, 6(5), 4779-4808. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i5.3438

National Geographic (19 de mayo de 2022). *¿Qué son los biocombustibles?* <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-son-los-biocombustibles>

Navarro, J. (8 de junio de 2021). *Contaminación del agua debido a la descomposición de los residuos sólidos (IV/IV)*. Iagua. <https://www.iagua.es/blogs/javier-navarro/efecto-lluvias-desechos-solidos-iiiiiv-0>

Noboa, J., Vergara, A., Sorhegui, R., & Garnica, L. (2021). Rethinking sustainable development in the territory. *Res Non Verba Revista Científica*, 11(1), 19-33. <https://doi.org/10.21855/resnonverba.v11i1.500>

Nogar, A. G., Chomicki, C., & Berdolini, J. L. (2019). Bioenergía a partir de residuos ganaderos. Estado de situación en la provincia de Buenos Aires. *Mundo Agrario*, 20(43). <https://doi.org/10.24215/15155994e110>

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA]. (2019). *Pérdida y desperdicio de alimentos*. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane>

ONU Habitat (12 de agosto de 2024). *Plan de Acción Regional para la implementación de la NAU en LAC*. <https://onu-habitat.org/index.php/plan-de-accion-regional-para-la-implementacion-de-la-nau-en-lac>

ONU-Habitat (12 de agosto de 2024). *Recolectar y eliminar residuos de manera eficiente*. <https://onu-habitat.org/index.php/recolectar-y-eliminar-residuos-de-manera-eficiente>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.). ¿Qué es bioenergía sostenible? <https://www.fao.org/energy/bioenergy/es/>

Organización de las Naciones Unidas, (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>

Organization for Economic Cooperation and Development - OECD (7 de mayo de 2020). *Revenue Statistics in Latin America and the Caribbean 2020*. <https://doi.org/10.1787/68739b9b-en-es>.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). *Global assessment of soil pollution: Report*. <https://openknowledge.fao.org/items/3cba5eed-e9a0-45f0-937b-35f26f2f2723>

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - OCDE (22 de febrero de 2022). *Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short, says OECD*. <https://www.oecd.org/en/about/news/press-releases/2022/02/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.html>

Organización Mundial de la Salud. (6 de julio de 2022). *Informe de las Naciones Unidas: las cifras del hambre en el mundo aumentaron hasta alcanzar los 828 millones de personas en 2021*. <https://www.who.int/es/news/item/06-07-2022-un-report--global-hunger-numbers-rose-to-as-many-as-828-million-in-2021>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (14 de junio de 2024). *Hambre e inseguridad alimentaria*. <https://www.fao.org/hunger/es/>

Our World in Data (2022). *Share of electricity production by source, European Union* 27. <https://ourworldindata.org/grapher/share=-elec-by-source?country=~European+Union+%2827%29>

Page, M., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E., Brennan, S., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M., Li, T., Loder, E., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>

Paniagua-Gutiérrez, S., Clavijo-Grandon, J., Orellana, R., & Sempértegui-Tapia, D. (2022). Evaluación de la generación de energía a partir de la gasificación de residuos sólidos urbanos en Cochabamba-Bolivia. *Investigación & Desarrollo*, 22(1), 25-36. <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-3i>

Piamonte, C. (1 de junio de 2023). *Día Mundial del Medio Ambiente 2023: Soluciones a la contaminación por plásticos*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://blogs.iadb.org/agua/es/dia-mundial-del-medio-ambiente-2023-soluciones-a-la-contaminacion-por-plasticos/>

Pichel, J. (20 de abril de 2019). *Por qué hay 18.000 plantas de biogás en Europa y apenas 50 en España*. El Confidencial. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/ciencia/2019-04-20/plantas-biogas-alemania-espana-europa_1949382/

Planelles, M. (22 de febrero de 2022). *Más de 140 millones de toneladas de plásticos contaminan ya los ríos, océanos y lagos del planeta*. El País. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2022-02-22/mas-de-140-millones-de-toneladas-de-plasticos-contaminan-ya-los-rios-oceanos-y-lagos-del-planeta.html>

Política y Legislación Ambiental - POLEA (15 de mayo de 2019). *El potencial de la biomasa en la energía. Estudio ejecutivo para tomadores de decisiones*. <https://www.polea.org.mx/estudios.php>

Pratt, G. (7 de marzo de 2022). ¿Qué es el biogás? CROWCON. <https://www.crowcon.com/es/blog/what-is-biogas/>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (15 de junio de 2019). *Informe sobre la Brecha de Producción 2019*. <https://www.unep.org/es/resources/informe/informe-sobre-la-brecha-de-produccion-2019>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (20 de agosto de 2021). *Las emisiones de metano están acelerando el cambio climático. ¿Cómo podemos reducirlas?* <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/las-emisiones-de-metano-estan-acelerando-el-cambio-climatico-como>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (28 de febrero de 2022). *Sexto informe de evaluación del IPCC: Cambio Climático 2022*. <https://www.unep.org/es/resources/informe/sexto-informe-de-evaluacion-del-ipcc-cambio-climatico-2022>

Quevedo, G. & Rodríguez, M. (2022). Introducción de sistema de captura de biogás en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo. *Ingeniería Energética*, 43(2), 90-98. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000200090&lng=es&tlng=es.

Quispe J. (2020). Determinación de la eficiencia en la gestión de residuos sólidos en las Municipalidades Distritales de la Región de Puno-Perú. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 4(2), 476-512. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v4i2.93

Raso, C. (31 de diciembre de 2021). *Europa produce la mitad del biometano y el biogás del mundo*. El Economista.es. <https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/noticias/11547537/12/21/Europa-produce-la-mitad-del-biometano-y-el-biogas-del-mundo.html>

Red de Política de Energía Renovable para el Siglo XXI - REN21 (25 de junio de 2019). *Renewable Energy Tenders and Community. Latin America and Caribbean* [Archivo PDF]. <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/06/LAC-Report.pdf>

Renewable Fuels Association-RFA (30 de setiembre de 2021). *Annual ethanol production U.S. and world ethanol production*. <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/view-all-markets-and-statistics#1454099103927-61e598f7-7643>

Requejo-La Torre, M. Rodríguez-Lichtenheldt, J., Gonzales-Castillo, J., Sánchez-Medina, G. & Astudillo, J. (2021). Valoración económica ambiental con fines turísticos del Área de Conservación Municipal “Asociación Hídrica Aguajal Renacal Alto Mayo”. *Revista de Economía e Sociología Rural*, 59(4). <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.192386>

Repsol (s.f.). *Energía procedente de la transformación de la biomasa*. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/bioenergia/index.cshtml>

Reuters (16 de agosto de 2024). *Death toll from Uganda garbage landslide climbs to 35*. <https://www.reuters.com/world/africa/death-toll-uganda-garbage-landslide-climbs-35-2024-08-16/>

Ritchie, H. (2019). *Food production is responsible for one-quarter of the world's greenhouse gas emissions*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/food-ghg-emissions>

Roca, J. (2020). *El mercado del biodiésel tiene futuro, según Wood Mackenzie*. El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/el-mercado-del-biodiesel-tiene-futuro-segun-wood-mackenzie/>

Romanello, M., Di Napoli, C., Drummond, P., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Berrang Ford, L., Belesova, K., Bowen, K., Cai, W., Callaghan, M., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., Van Daalen, K., Dalin, C., Dasandi, N... Costello, A. (2022). The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: health at the mercy of fossil fuels. *The Lancet*, 400(10363), 1619-1654. [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(22\)01540-9/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(22)01540-9/fulltext)

Romero, G. (21 de noviembre de 2023). *Energía sostenible para el futuro: claves para el escalado del biometano*. Revista Técnica de Medioambiente. <https://www.retema.es/articulos-reportajes/energia-sostenible-para-el-futuro-claves-para-el-escalado-del-biometano>

Sabbatella, I. (2022). La economía política internacional de las bioenergías: avances y límites en el mercado eléctrico argentino. *Relaciones Internacionales*, 31(63), 158. <https://doi.org/10.24215/23142766e158>

Sánchez-Hervas, J. M., Ortiz, I., Márquez, A., Fernández-Fernández, A. M., Canivell, M., & Ruiz, E. (2023). Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible y simbiosis industrial en la comunidad de Madrid (España). *Revista Tecnología en Marcha*, 36(10), 45-54. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7010>

Scania Group (3 de diciembre de 2022). *The future is super*. <https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks/super-powertrain.html>

Serrato, D., Flóres, L., Tibaquirá, J., & Restrepo, A. (2018). Análisis CFD de la combustión no premezclada de H₂ como estudio preliminar de la combustión de gas de síntesis producto de la gasificación de biomasa. *Revista de Ciencias*, 22(2), 89-107. 10.25100/rc.v22i2.7922

Sevillano, E. (1 de junio de 2024). *Biocombustibles avanzados a la conquista de las gasolineras*. El País. <https://elpais.com/extra/energia/2024-06-02/biocombustibles-avanzados-a-la-conquista-de-las-gasolineras.html>

Sistema de Información de Gestión de Residuos Sólidos-SIGERSOL (2021). *Información destacada sobre gestión de residuos municipales*. <https://site.mimam.gob.pe/Informacion>

Sosa, E. (2022). Alternativas bioenergéticas de los residuos sólidos urbanos: panorama en México. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 31, 59-76. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.31.2022.5086>

Suárez-Chernov, V., López-Díaz, I. & Álvarez-González, M. (2019). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Centro Azúcar*, 46(1), 73-85. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612019000100073&lng=es&tlng=es.

Sun, Y., Qin, Z., Tang, Y., Huang, T., Ding, S., & Ma, X. (2021). Techno-environmental-economic evaluation on municipal solid waste (MSW) to power/fuel by gasification-based and incineration-based routes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). 10.1016/j.jece.2021.106108

Torres, M. & García, N. (2021). Trayectorias del pensamiento crítico social y ambiental en la investigación. Caso Maestría de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. *Entramado*, 17(2), 180-195. <https://www.redalyc.org/journal/2654/265470004012/html/>

Torroba, A (14 de setiembre de 2021). *Consumo mundial de biocombustibles aumentará hasta un 8 % este año tras débil 2020*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://iica.int/es/prensa/noticias/consumo-mundial-de-biocombustibles-aumentara-hasta-un-8-este-ano-tras-debil-2020>

Transport & Environment (6 de diciembre de 2023). *Halt deforestation-driving soy biofuels before it is too late*. <https://www.transportenvironment.org/articles/last-chance-to-halt-deforestation-driving-soy>

Triviño, J., Reyes, C., & Sánchez, J. (2021). Subproductos generados en el tratamiento y valorización de residuos sólidos urbanos dentro del concepto de biorrefinería: una revisión sistemática. *Revista Ingeniería y Región*, 25. 10.25054/22161325.2783

Trivisonno, L., Escobar, C., Vergara-Merino, L., Pérez-Bracchiglione, J., & Ariel, J. (2021). Conceptos clave para la búsqueda de evidencia: una introducción para profesionales de la salud. *Medwave*, 21(11), 10.5867/medwave.2022.01.002512

Tsui, T.-H., & Wong, J. W. (2019). A critical review: emerging bioeconomy and waste-to-energy technologies for sustainable municipal solid waste management. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 1, 151-167. 10.1007/s42768-019-00013-z

Uekert, T., Pichler, C. M., Schubert, T., & Reisner, E. (2020). Solar-driven reforming of solid waste for a sustainable future. *Nature Sustainability*, 4, 383-391. 10.1038/s41893-020-00650-x

United Nations Environment Programme. (2024). *Beyond an age of waste*. <https://www.unep.org/es/resources/perspectiva-mundial-de-la-gestion-de-residuos-2024>

Vargas-García, Y., Pazmiño Sánchez, J. & Dávila Rincón, J. (2021). Potencial de biomasa en América del Sur para la producción de bioplásticos. Una revisión. *Revista Politécnica*, 48(2), 07-20. <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2.01>

Villadiego, L. & Castro, N. (24 de junio de 2020). *Soja ¿la nueva palma de los biocombustibles?* Ecologistas en Acción. <https://www.ecologistasenaccion.org/146565/informe-soja-la-nueva-palma-de-los-biocombustibles/>

VOLTA (9 de diciembre de 2020). *El panorama de los países latinoamericanos con sus residuos*. <https://www.voltachile.cl/panorama-paises-latinoamericanos-con-sus-residuos/>

Vuong, T. & Bui, H. (2023). The role of corporate social responsibility activities on employees' perception of brand reputation and brand equity. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100313>

Wenzel, F. (7 de marzo de 2024). Amazonía: estudio advierte que el 10% de la selva podría convertirse en un ecosistema más seco y degradado para el año 2050. *Mongabay Latam*. <https://es.mongabay.com/2024/03/amazonia-estudio-ecosistema-seco-degradado-2050/>

Wiatros-Motyka, M., Jones, D., Broadbent, H., Fulghum, N., Bruce-Lockhart, Ch., Dizon, R., MacDonald, P., Moore, Ch., Candlin, A., Lee, U., Copsey, L., Hawkins, S., Ewen, M., Worthington, B., Benham, H., Trueman, M., Yang, M., Lolla, A., Shahram Edianto, A., Czyżak, P., Brown, S., Rosslowe, C. & Black, R: (2023). *Global Electricity Review 2023*. Ember. <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>

World Wildlife Fund (2021). *An Eco-wakening. Measuring global awareness, engagement and action for nature* [archivo PDF]. The Economist Intelligence Unit. https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/an_ecowakening_measuring_awareness__engagement_and_action_for_nature_final_may_2021__.pdf

Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Saravanan, A., Varjani, S., & Ramamurthy, R. (2020). Bioconversion of municipal solid waste into bio-based products: A review on valorisation and sustainable approach for circular bioeconomy. *Science of The Total Environment*, 748. 10.1016/j.scitotenv.2020.141312

Zahedi, S., García-Morales, J. L., Sales, D., & Solera, R. (2017). Bioenergy Generation from Municipal Solid Waste and Glycerin Waste: Population Dynamics. *Energy & Fuels*, 31(9), 9550-9556. 10.1021/acs.energyfuels.7b01526

Zapien-Rodríguez, J. M., Solorio-de Jesús, B., Ballesteros-Pacheco, J. C. & Núñez-Ayala, F. (2019). Generación eléctrica a partir de la fotosíntesis natural; ¿una realidad escalable? *Revista de Energías Renovables*, 3(1), 1-6. https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Energias_Renovables/vol3num10/Revista_de_Energ%C3%ADas_Renovables_V3_N10_1.pdf

SOBRE LOS AUTORES

Jesús Luzmila Benique Carreón

Universidad Nacional de Juliaca

<https://orcid.org/0000-0002-0234-2085>

Carlos Enrique Coacalla Castillo

Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac

<https://orcid.org/0000-0002-6076-1800>

Alberto Octavio Carranza López

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

<https://orcid.org/0000-0002-5147-2134>

Jose Eugenio Chafloque Capuñay

Centro de Medicina Biológica Divina Esperanza

<https://orcid.org/0009-0002-4642-1540>

Reyder Alexander Lambruschini Espinoza

Universidad Nacional Hermilio Valdizán

<https://orcid.org/0000-0003-0701-2621>

GENERACIÓN DE BIOENERGÍA A PARTIR DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS



www.arcoeditores.com
contato@arcoeditores.com
(55)99723-4952