

RESIDUOS CON VALOR:

**Procesos de Recuperación y Aprovechamiento
en Contextos Urbanos y Rurales**



**Fernando Antonio Sernaqué Auccahuasi
Marlitt Florinda Naupay Vega
Samuel Carlos Reyna Mandujano
Karina Inés Hinojosa Pedraza**

Conservación Ecológica, Socio Ambiental y Divulgación Científica – CECOSAM-UNFV



RESIDUOS CON VALOR:

Procesos de Recuperación y Aprovechamiento
en Contextos Urbanos y Rurales



Fernando Antonio Sernaqué Auccahuasi
Marlitt Florinda Naupay Vega
Samuel Carlos Reyna Mandujano
Karina Inés Hinojosa Pedraza

Conservación Ecológica, Socio Ambiental y Divulgación Científica - CECOSAM-UNFV



Conselho Editorial

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva - UNIDAVI
Prof. Dr. Astor João Schönell Júnior - IFFAR
Prof. Dr. Alan Ricardo Costa - UFRR
Prof. Dr. Allan Diêgo Rodrigues Figueiredo - UESPI
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 da Silva - 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 - UNISANTOS
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

Editor Chefe: Ivanio Folmer

Bibliotecária: Maria Alice Ferreira

Projeto gráfico e Diagramação: Gabriel Eldereti Machado

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

Residuos con valor [livro eletrônico] : procesos de recuperación y aprovechamiento en contextos urbanos y rurales / Fernando Antonio Sernaqué Auccahuas ... [et al.]. -- 1. ed. -- Santa Maria, RS : Arco Editores, 2025.
PDF

Outros autores: Marlitt Florinda Naupay Vega, Samuel Carlos Reyna Mandujano, Karina Inés Hinojosa Pedraza

Bibliografia

ISBN 978-65-5417-542-5

1. Administração rural 2. Educação ambiental
3. Gestão ambiental 4. Lixo – Recuperação 5. Meio ambiente 6. Meio ambiente urbano 7. Reciclagem (Resíduos etc.) 8. Resíduos sólidos – Aspectos ambientais – Administração I. Auccahuas, Fernando Antonio Sernaqué. II. Vega, Marlitt Florinda Naupay. III. Mandujano, Samuel Carlos Reyna. IV. Pedraza, Karina Inés Hinojosa.

25-301559.0

CDD-361.728

Índices para catálogo sistemático:

1. Resíduos : Reciclagem : Problemas ambientais 361.728

Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964



10.48209/978-65-5417-542-5

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.



PROLOGO

En un mundo en el que la producción de desechos es un problema cada vez más grande, resulta esencial encontrar soluciones sostenibles e innovadoras. El libro *“Residuos con Valor”: “Procesos de Recuperación y Aprovechamiento en Contextos Urbanos y Rurales”* es una contribución valiosa en este sentido, pues ofrece una perspectiva exhaustiva y minuciosa sobre los métodos y procedimientos para recuperar y utilizar residuos.

El propósito principal de este libro es llevar a cabo revisiones bibliográficas acerca de tecnologías innovadoras y contemporáneas para el reciclaje y la utilización de desechos, con el objetivo de ofrecer una guía teórica y práctica a quienes desean poner en marcha soluciones sostenibles en la administración de residuos. Este asunto es particularmente pertinente para las empresas y organizaciones que se preocupan por la responsabilidad social y la sostenibilidad, así como para los estudiantes y jóvenes que están interesados en el medio ambiente, la ciencia y la sostenibilidad.

Es imprescindible y urgente el proceso de recuperación y utilización de residuos, siendo la utilización de los residuos con valor la base para transformar el medioambiente. Este libro tiene como objetivo transmitir este mensaje esencial y proporcionar una perspectiva precisa y directa de los retos y oportunidades que implica la valorización de residuos.

El libro tiene un estilo y un tono formales, lo cual demuestra la seriedad y relevancia del asunto. Es crucial leer este libro para los que pretenden comprender la relevancia de valorar los residuos y cómo se puede llevar a cabo de forma eficiente en diversas situaciones.

En suma, *“Residuos con Valor”: “Procesos de Recuperación y Aprovechamiento en Contextos Urbanos y Rurales”* es un libro que brinda una perspectiva exhaustiva y minuciosa sobre la valorización de los residuos, y se sugiere su lectura a todos aquellos interesados en comprender y tratar de forma sostenible el problema de la producción de desechos.

PRESENTACIÓN

La obra “Residuos con valor”: “Procesos de recuperación y aprovechamiento en contextos rurales y urbanos” surge como una reflexión fundamentada para enfrentar un desafío apremiante: ¿cuál es la manera de recuperar y aprovechar los residuos, con eficiencia y sostenibilidad, tanto en áreas urbanas como rurales? La sociedad se ve afectada por el aumento de residuos, y es esencial encontrar soluciones sustentables e innovadoras para hacer frente a este problema.

Este libro ofrece una perspectiva integral y minuciosa de los métodos y procedimientos para la recuperación y utilización de residuos, abarcando desde la valorización de materiales hasta la valorización energética. Enfoca su análisis en las oportunidades y desafíos vinculados con la valorización de desechos, proporcionando una guía práctica y teórica para aquellos que desean establecer soluciones sostenibles en el manejo de residuos.

La obra está compuesta por tres capítulos que abordan la clasificación y definición de residuos sólidos, así como la valorización de los residuos sólidos tanto municipales como no municipales. En cada uno de los capítulos se exponen las nociones teóricas fundamentales y los principios básicos para la valorización de residuos, además de las tecnologías y procedimientos que existen para la recuperación y el uso eficiente de residuos.

La finalidad de este libro es evidente: funcionar como una guía para prácticas de gestión de residuos que sean sostenibles, eficaces y que respeten el medio ambiente. Está diseñado para las empresas y organizaciones que tienen interés en la responsabilidad social y la sostenibilidad, así como para los alumnos y jóvenes que están interesados en la ciencia, el medio ambiente y la sustentabilidad.

Es crucial leer este libro para los que pretenden comprender la relevancia de valorar los residuos y cómo se puede llevar a cabo de forma eficiente en diversas situaciones. Proporciona un marco conceptual que enfatiza la importancia de recuperar y utilizar los residuos para la transformación ambien-

tal. Porque, por supuesto, lo esencial es que la administración de residuos mantenga su faceta humana. No se trata simplemente de cifras o resultados instantáneos; se trata de sostener un proceso de transformación vivo, que esté abierto al diálogo y a la crítica.

CONTENIDO

Introducción.....	12
CAPITULO I. Conceptos y Clasificación de Residuos Sólidos.....	14
1.1. Descripción general de los residuos sólidos.....	14
1.1.1. Clasificación de residuos de acuerdo a su procedencia.....	15
CAPITULO II. Valorización de Residuos Sólidos Municipales.....	17
2.1. Generalidades.....	17
2.2. Operaciones de valorización.....	19
2.2.1. Valorización material.....	19
2.2.2. Valorización energética.....	31
2.2.3. Gestión de residuos en vertedero.....	54
CAPITULO III. Valorización de Residuos Sólidos No Municipales.....	57
3.1. Generalidades.....	57
3.2. Operaciones de valorización material.....	57
3.2.1. Reciclaje.....	59
3.2.2. Reutilización.....	62
3.3. Operaciones de valorización energética.....	62
3.3.1. Coincineración.....	63
3.3.2. Recuperación de aceites.....	64
3.3.3. Coprocesamiento.....	68
3.3.4. Pirólisis.....	69
3.3.5. Biodiésel.....	72
Conclusiones.....	75
Epílogo.....	77
Glosario.....	78
Referencias.....	80
Sobre Los Autores.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de residuos sólidos.....	16
Figura 2. Porcentaje de plástico reciclado por país.....	21
Figura 3. Clasificación de plásticos según su reutilización.....	22
Figura 4. Modelo de planta de compostaje en Chile.....	24
Figura 5. Residuos útiles para el proceso de compostaje.....	25
Figura 6. Materia orgánica dentro de ecosilos.....	26
Figura 7. Compostaje en terreno.....	26
Figura 8. Sistema de pirolizado y aplicación en un vivero municipal.....	29
Figura 9. Esquema detallado de las técnicas de transformación termoquímica de biomasa.....	33
Figura 10. Valorización energética mediante procesos químicos, termoquímicos, termomecánicos, bioquímicos, mecánicos y biológicos....	40
Figura 11. Componentes de una planta de incineración de residuos sólidos urbanos.....	41
Figura 12. Proceso de incineración con recuperación de energía.....	42
Figura 13. Esquema de una planta de incineración con recuperación de energía.....	43
Figura 14. Esquema de incineración en horno de parrilla.....	44
Figura 15. Esquema de horno rotativo de incineraci.....	45
Figura 16. Esquema de horno de lecho fluido circulante.....	46
Figura 17. Esquema de obtención del biogás.....	47
Figura 18. Proceso de biometanización para la obtención de biogás y recuperación de energía.....	48
Figura 19. Esquema de proceso de gasificación.....	52
Figura 20. Esquema de una descarga de corriente continua.....	53
Figura 21. Diagrama del tratamiento previo de aceites vegetales usados....	66
Figura 22. Esquema general para la obtención de biodiesel.....	67
Figura 23. Pirólisis para el tratamiento de residuos electrónicos.....	71

Figura 24. Diagrama de proceso planta de pirólisis.....	72
Figura 25. Proceso de transesterificación del aceite.....	73
Figura 26. Materias primas de biodiés.....	73
Figura 27. Valorización energética mediante la tecnología SMRF para la obtención de ECODIESEL.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Generación de residuos según diversos factores.....	15
Tabla 2. Código de colores para los residuos del ámbito municipal.....	23
Tabla 3. <i>Calor del gas de síntesis generado mediante la gasificación de biomasa para diversos métodos de gasificación.....</i>	<i>37</i>
Tabla 4. <i>Tipos de procesos de conversión termoquímica.....</i>	<i>38</i>
Tabla 5. <i>Características principales de los diferentes gasificadores.....</i>	<i>51</i>
Tabla 6. <i>Prácticas aplicadas para reciclaje.....</i>	<i>61</i>
Tabla 7. <i>Código de colores para los residuos del ámbito no municipal.....</i>	<i>61</i>

INTRODUCCIÓN

El presente libro, titulado *Residuos con Valor: Procesos de Recuperación y Aprovechamiento en Contextos Urbanos y Rurales*, forma parte de una búsqueda hacia el aprovechamiento de desechos brindando un valor agregado. La elaboración de este libro presenta rigurosidad en la investigación y en la búsqueda de fuentes a nivel internacional y nacional sobre la búsqueda de una visión completa en distintos ámbitos acerca de técnicas más efectivas para la recuperación y aprovechamiento de residuos. Buscando aportar un enfoque sostenible y eficiente sobre la recuperación y aprovechamiento de residuos se plasmarán las problemáticas presentadas en los contextos urbanos y rurales, así como las formas innovadoras y eficientes para su disminución y aprovechamiento mediante los diversos procesos actuales existentes. Con la necesidad de valorizar y reaprovechar los residuos urbanos y rurales se realiza, el objetivo es realizar revisiones bibliográficas sobre tecnologías innovadoras y actuales.

Uno de los puntos más importantes en la valoración de residuos es conocer el potencial de cada residuo generado en los contextos urbanos y rurales para su posterior recuperación y aprovechamiento. Este se determina mediante las características de los desechos, así como las ventajas y desventajas de su manejo y uso.

El presente libro se segmenta en capítulos para la valorización de desechos sólidos municipales y no municipales, mencionando en cada caso las operaciones para la obtención de materia o energía. No obstante, las actividades pueden llevarse a cabo tanto para desechos sólidos municipales como no municipales, sin distinción alguna. La diferencia relevante radica en la inversión y el beneficio de las operaciones, dado que algunas de estas son más habituales o utilizadas en municipios, empresas privadas e industrias.

El presente libro se desglosa en los siguientes capítulos:

CAPITULO I Conceptos y Clasificación de Residuos Sólidos. Este capítulo describe un panorama general de los residuos sólidos y describe su

relevancia en la gestión de residuos sólidos, detalla la clasificación y gestión de acuerdo a su origen y nivel de peligro.

CAPITULO II: Valorización de Residuos Sólidos Municipales. En este capítulo se plasmarán las bases teóricas y conceptos básicos de la valorización de residuos en contextos urbanos y rurales, paso esencial para iniciar una gestión sostenible adecuada. Este capítulo ofrece una descripción de los métodos de valoración de desechos sólidos municipales, tratando de forma detallada los procesos, los beneficios y los inconvenientes, con el propósito de proporcionar los diferentes elementos de valoración de residuos municipales.

CAPITULO III: Valorización de Residuos Sólidos No Municipales. En este capítulo se describe la valorización de residuos sólidos no municipales. Se mencionan y detallan las tecnologías existentes en las cuales se pueden valorizar promoviendo la sostenibilidad en operaciones de valorización material y valorización energética.

CAPÍTULO I

CONCEPTOS Y CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

1.1. Descripción general de los residuos sólidos

Se conoce como residuos o desechos a los materiales o subproductos inservibles que se extraen de un proceso biodegradable, ya sea de plantas o animales. Es posible clasificarlos en diversas formas como sólidas, líquidas, orgánicas, reciclables o peligrosas. No obstante, los desechos sólidos representan desafíos significativos para la humanidad, particularmente en las comunidades urbanas (Siddiqua et al., 2022, p.3).

Los desechos sólidos han sido establecidos de forma diversa por entidades o personas con propósitos de administración o estudio académico. Se puede definir como los residuos domésticos e industriales, la basura o cualquier material despreciado generado durante el día a día y las actividades industriales; Puede ser de riesgo o no de riesgo. En Estados Unidos, según una normativa relevante (la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos, RCRA, título 40 del Código de Regulaciones Federales, partes 239-282), la clasificación de desechos sólidos abarca no solo la etapa sólida de los elementos de desecho, asimismo también los lodos (de las instalaciones de tratamiento de residuos), las aguas residuales del proceso de producción y los lodos no residuales, líquidos residuales (Tang y Huang, 2024, p.115).

Los elementos y la cantidad de desechos sólidos son cruciales para establecer las tácticas correctas de administración y administración de los residuos. Incluye vidrio, metales, latas de aluminio, desechos de madera, desechos del jardín, desechos alimenticios, papel, goma, plásticos, textiles, cuero, materiales para la construcción y demolición, entre otros. No obstante, los elementos orgánicos en los desechos sólidos superan a los de los residuos sólidos debido a un incremento en el consumo de alimentos domésticos y desechos comerciales (Amin et al., 2023, p.2).

Los desechos sólidos orgánicos son de carácter variado con distintas propiedades físicas y químicas. Estos factores comprenden el nivel de humedad, la dimensión de la partícula de desecho, la densidad, la necesidad química de oxígeno (DQO), los sólidos totales (TS), el potencial de biometano (BMP), el nitrógeno total (TN) y el fósforo total (TP) (Abdel-Shafy y Mansour, 2018, p.1275). Adicionalmente, los desechos sólidos orgánicos poseen elementos nutritivos, tales como lípidos, proteínas, carbohidratos, minerales, entre otros, que pueden ser reutilizados como ingrediente en la elaboración de productos de origen biológico (Ren et al., 2021, p.439).

Los desechos orgánicos son biodegradables y provienen mayormente de residuos de la agricultura o de alimentos (Sharma et al., 2022, p.1373). La clasificación de estos residuos varía entre municipios, regiones y naciones, basándose en el estilo de vida, las pautas para la administración de desechos, la estructura industrial y la condición financiera.

1.1.1. Clasificación de residuos de acuerdo a su procedencia

Los residuos sólidos se categorizan en diversos conjuntos, en función de la procedencia u origen y su característica:

Tabla 1. *Generación de residuos según diversos factores*

Según su origen	Doméstico
	Comercial
	Industrial
	Médico
	Residuos electrónicos
Según su contenido	Material orgánico
	Vidrio
	Metal
	Plástico
	Productos químicos
De acuerdo con el potencial de peligro	Nocivo
	Inflamable
	Radiactivo
	Infeccioso

Nota. Adaptado de Kumar y Sharma (2023, p.153).

De acuerdo con su procedencia, los desechos sólidos comprenden los desechos domésticos, institucionales, agrícolas, biomédicos, municipales e industriales (Rajendra et al., 2021, p.3). No obstante, en función de su naturaleza, los desechos sólidos pueden clasificarse en residuos orgánicos, residuos inorgánicos, residuos biodegradables, residuos no biodegradables, residuos de riesgo y residuos de seguridad (Varjani et al., 2021, p.2). Otras clases de desechos sólidos incluyen los desechos plásticos, los desechos radiactivos, los desechos de aguas residuales, los desechos provenientes de la minería y los desechos provenientes de cenizas de residuos (Prajabati et al., 2021, p.2).

Figura 1. *Tipos de residuos sólidos*



Nota. Tomado de Adetunji et al. (2023)

La producción de desechos se relaciona con el progreso financiero y la situación de ingresos de una nación específica (Yaashikaa et al., 2020, p.4). De acuerdo con un reporte del Banco Mundial, en 2016 se produjeron $1,3 \times 10^9$ Toneladas a nivel global. Esto se incrementó a $3,40 \times 10^9$ toneladas anuales y se prevé un aumento del 70% para el año 2050 (Kaza et al., 2018, p.11). Por lo tanto, es crucial la correcta gestión de los desechos sólidos para minimizar la contaminación y fomentar su reutilización como insumo para la elaboración de productos de gran valor.

CAPÍTULO II

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

2.1. Generalidades

La gestión y la eliminación de residuos sólidos se han transformado en cuestiones universales que necesitan ser tratadas para el bienestar de la humanidad, ya que, los impactos perjudiciales de los desechos sólidos sin tratamiento son catastróficos para la salud pública y perjudican las condiciones del medio ambiente que surgen de estos (Imran et al., 2025, p.2).

Los desechos sólidos urbanos (RSU) que se clasifica dentro de los residuos sólidos municipales se está incrementando a nivel global y una administración incorrecta afecta el medio ambiente y la salud de la población. Por lo tanto, hay un incremento en el interés por hallar soluciones eficaces, y el reconocimiento de tendencias de investigación contribuye a establecer las mejores rutas de administración y valoración. No obstante, los exámenes actuales frecuentemente se enfocan únicamente en tecnologías particulares o en análisis de casos regionales, sin un estudio detallado de las tendencias globales de la investigación (Kafle et al., 2025, p.113).

Hace décadas, se introdujeron las tecnologías de transformación de desechos en energía para generar energía y productos de valor a partir de residuos. Esto abrió la vía para descubrir tecnologías en el manejo de residuos basadas en una herramienta conocida como “jerarquía de desechos”: disminuir, reutilizar, reciclar y recuperar en los vertederos (Voss et al., 2021, p.206).

La valorización de los desechos sólidos se refiere al proceso que busca que el residuo, uno o varios de los componentes que lo conforman, sean reutilizados y tengan un propósito beneficioso al reemplazar a otros materiales o recursos en los procesos de producción. El valor puede ser de tipo material o energético.

La estimación de los desechos tanto municipales como no municipales se basa en el sistema de recolección selectiva y en el régimen especial de residuos de productos de prioridad, conforme a las políticas de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) (Decreto Legislativo N° 1278, 2016).

Representan operaciones de valorización de materiales: el reaprovechamiento, reciclado, compostaje, recuperación de aceites, bio-conversión, entre otras opciones que, mediante procesos de transformación física, química u otros, demuestren su factibilidad técnica, económica y ecológica.

Se trata de operaciones de valorización energética, las cuales buscan utilizar desechos con el objetivo de explotar su potencial energético, como: coprocesamiento, coincineración, producción de energía mediante procesos de biodegradación, biochar, entre otros. Las regulaciones relacionadas con la valorización se llevarán a cabo en colaboración con las autoridades sectoriales pertinentes (Decreto Legislativo N° 1278, 2016)

Los residuos del ámbito de la gestión municipal o residuos municipales, están conformados por los residuos domiciliarios y los provenientes del barrido y limpieza de espacios públicos, incluyendo las playas, actividades comerciales y otras actividades urbanas no domiciliarias cuyos residuos se pueden asimilar a los servicios de limpieza pública, en todo el ámbito de su jurisdicción. (Decreto Legislativo N° 1278, 2016)

La evaluación de los desechos sólidos municipales debe tener prioridad en comparación con la disposición final de estos.

Las entidades municipales tienen la facultad de llevar a cabo las operaciones de valorización de desechos sólidos municipales mencionadas en el artículo 48 del Decreto Legislativo N°1278, de manera directa o mediante las organizaciones de recicladores debidamente acreditados o las EO-RS.

La puesta en marcha de otras operaciones de valorización de desechos sólidos municipales que no sean las mencionadas en el artículo 48 del Decreto Legislativo N° 1278, requiere la aprobación previa del MINAM.

Las entidades municipales tienen la facultad de establecer instalaciones de valorización de materiales o energía de desechos sólidos municipales, en infraestructuras que se ajusten a las especificaciones dictadas en el artículo

105 del Reglamento del D.L. N°1278. MINAM, 2017 (Decreto Supremo N° 014 – 2017)

Las entidades municipales deben priorizar los desechos orgánicos derivados del mantenimiento de zonas verdes y mercados municipales, además de, si es viable, los residuos orgánicos originados en el hogar.

Los proyectos de jardines y parques municipales son esencialmente beneficiados por el compost, humus o biochar generado con los desechos orgánicos originados por el servicio de limpieza pública. Si existen excedentes, estos podrían ser usados para donaciones generales o para intercambio con otras municipalidades. (Edicto Legislativo Número 1278, 2016).

2.2. Operaciones de valorización

La investigación de Kafle et al. (2025, p.118), reveló que los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se gestionan principalmente por medio de siete vías principales: vertedero e incineración a cielo abierto, reciclaje y recuperación de materiales, vertederos y recuperación de gases, transformación física, transformación termoquímica, transformación bioquímica y transformación química.

2.2.1. Valorización material

Las actividades de valorización material de los desechos sólidos municipales pueden llevarse a cabo siguiendo las directrices de Orbegoso & Muller (2019, p.18), estableciendo instalaciones de valorización de residuos orgánicos: plantas de compostaje y centros de recolección.

2.2.1.1. Reciclaje y recuperación de materiales

El reciclaje de materiales de desechos plásticos sigue el principio de la química ochemia, que se traduce como combinación o unión, y al concepto helénico clásico de que un elemento es capaz de convertirse en otro (Demets et al., 2021, p.3).

Alrededor del 14% de los RSU se recicla a nivel global, y los países con ingresos elevados reciclan cerca del 29%, mientras que los países con ingresos reducidos reciclan únicamente el 4% (Kaza et al., 2018, p.4). Los Residuos Sustentables son componentes reciclables tales como desechos orgánicos, plásticos, metales, vidrio y madera. La administración eficaz de los desechos es vital para el bienestar de las ciudades, e implica la recolección y categorización de los materiales reciclables en específicos centros de separación. El reciclaje produce ventajas financieras de materiales como plásticos, papel y metales, mientras que los desechos orgánicos pueden transformarse en compost o biogás. Por ejemplo, el reciclaje de una tonelada de smartphones puede generar 0,347 kg de oro, lo que equivale al 80% del valor del material (Peng et al., 2023, p.765).

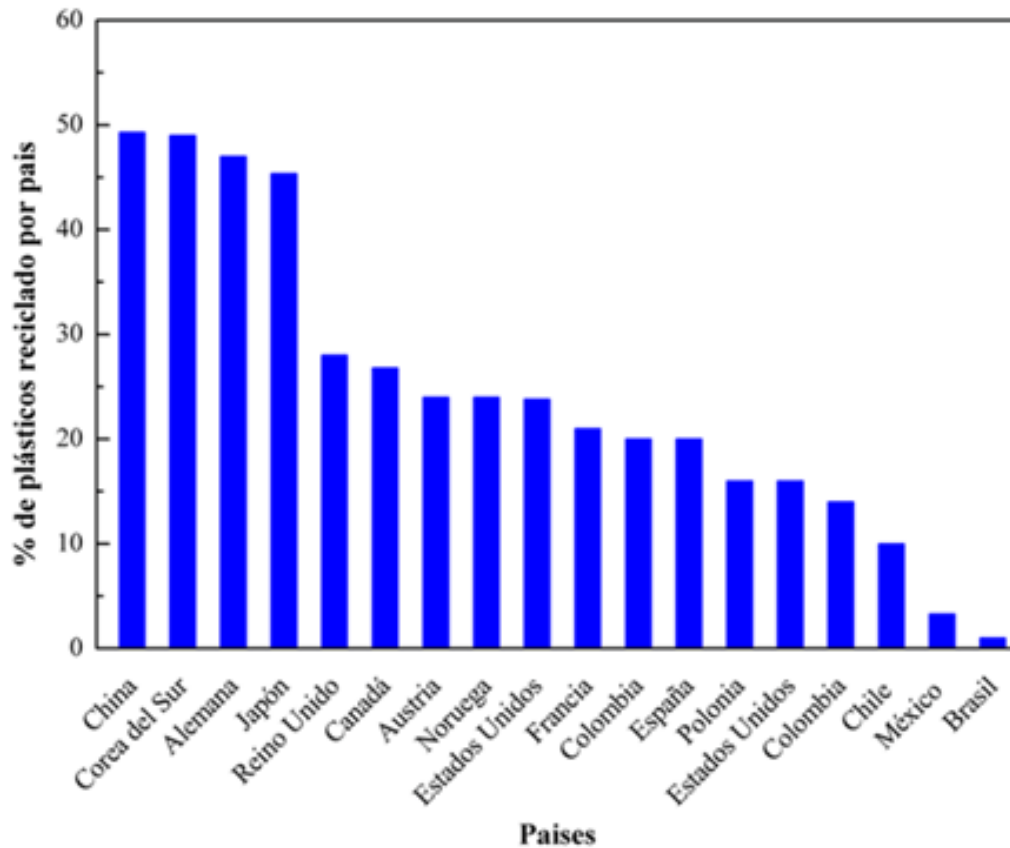
El reciclaje y la recuperación de materiales desempeñan un rol esencial en la administración de los Residuos Sustentables en los países avanzados, gracias a los progresos tecnológicos. Los avances en los métodos de clasificación y procesamiento, como la automatización, han potenciado considerablemente estas actividades. Aunque las inquietudes acerca de la contaminación cruzada se han reducido principalmente, los países en vías de desarrollo todavía se encuentran con retos originados por las desigualdades tecnológicas (Zhang et al., 2024, p.2). La fusión con otras vías de ingeniería contribuye a disminuir los gastos medioambientales. Por ejemplo, el reciclaje y el tratamiento biológico de los desechos alimenticios contribuyen a reducir la carga en los vertederos, mientras recuperan energía y producen biofertilizantes (Iqbal y Chen, 2020).

No obstante, aún existen retos, como la limitada sensibilización pública y la tecnología deficiente en numerosos países de bajos recursos, sumado a los elevados gastos asociados al reciclaje (Kurniawan et al., 2022, p.83).

Desde el comienzo del reciclaje en 1970, el volumen de plástico reciclado ha fluctuado geográficamente en función del tipo de plástico y su uso. En la actualidad, China y Corea del Sur ocupan las primeras posiciones a nivel global, al reciclar aproximadamente el 50% de los residuos plásticos. Van a continuación de Alemania y Japón, con un reciclaje del 47%, mientras que Reino

Unido y Canadá tienen un reciclaje del 28 y 26%, respectivamente (Valarezo y Ruiz, 2022, p.206).

Figura 2. *Porcentaje de plástico reciclado por país*



Nota. Tomado de Valarezo y Ruiz (2022, p.206)

Hay diversas categorizaciones de los plásticos según sus elementos esenciales, reutilización, proceso de fabricación, etc. Chidepatil et al., (2020, p.21) los categorizó en tres categorías, entre ellas, reciclables, no reciclables y complejos o desconocidos como se aprecia en la figura 2. Los plásticos que se toman en cuenta aquí se clasifican de acuerdo con la clasificación europea establecida en la Comisión Europea 1997.

Figura 3. *Clasificación de plásticos según su reutilización*

	 03 PVC	Plumbing pipes, cling films, ducts, sewage pipes, etc.			
	 04 PE-LD	Cling wrap, grocery/ frozen food bags, honey/ mustard squeezable bottles, etc.	 03 PVC	Gutter	
 01 PET	Soda / water / salad dressing bottles, medicine / butter / jelly jars, bean / rote bags, etc.	 05 PP	Tupperware, kitchenware, take-out containers, disposable cups and plates, etc.	 04 PE-LD	Flexible container lids
 02 PE-HD	Milk / juice jugs, shampoo / soap bottles, detergent containers, grocery / trash bags, toys, etc.	 06 PS	Disposable coffee cups, food boxes, cutlery, packing foam, packing peanuts, etc.	 07 O	Hub caps (ABS), optical fibres (PBT), eyeglasses lenses, roofing sheets (PC), touch screens (PMMA), cable coating in telecommunications (PTFE), surgical devices, etc.
 03 PVC	Tile, window frames.	 07 O	CDs and DVDs, medical storage containers, eyeglasses, exterior lighting fixtures, etc.		
Recyclable plastic		Non-recyclable plastic		Complex plastic	

Nota. Tomado de Chidepatil et al., (2020, p.21)

Considerando todos los recursos y la energía empleados en la fabricación de cada artículo plástico, resulta crucial que se emplee y se descarte de forma responsable cualquier clase de este material, donde Chidepatil et al. (2020, p.23), presenta los 3 métodos para gestionar los residuos plásticos:

- La primera de estas se realiza a través de procesos de reciclaje o reutilización, ignorando el destino final para el que se fabricó el plástico, proporcionándole un nuevo uso a través de procesos físicos de termoformación.
- El segundo método es la aniquilación térmica o descomposición química, donde el factor principal es la regulación de las emisiones de gases perjudiciales; actualmente se están implementando procesos de pirólisis para aprovechar de manera más efectiva este procedimiento y la producción de biodiesel.
- La tercera modalidad consiste en la acumulación en rellenos sanitarios, en vertederos a cielo abierto o en suelo natural.

Las instalaciones de valorización de desechos sólidos deben, al menos, satisfacer las condiciones siguientes:

- a) No deben situarse en zonas de zonación residencial, comercial o de esparcimiento
- b) No interferir con el tráfico de vehículos o peatones.
- c) Poseer un sistema para lavar, limpiar y fumigar.
- d) Disponer de vías para la evacuación de aguas pluviales, conforme corresponda. MINAM, 2017 (Decreto Supremo N° 014 – 2017 – MINAM, 2017).

El MINAM define objetivos anuales para el aprovechamiento de desechos municipales, que se fundamentan en el sistema de recolección selectiva para su posterior venta y/o recuperación, reutilización o reciclaje. El MINAM verifica que se han alcanzado los objetivos. (Decreto Legislativo N° 1278, 2016).

Aplicación del código de colores

Es necesario emplear el código de colores en los contenedores destinados al almacenamiento de desechos sólidos, o en las etiquetas que identifiquen el desecho sólido a guardar (Norma Técnica Peruana 900.58, 2019, p. 5).

Tabla 2. *Código de colores para los residuos del ámbito municipal*

Residuos del ámbito municipal		
Tipo de residuo	Color	Ejemplos de residuos
Aprovechables	Verde	Papel, cartón, vidrio, plástico, textiles, madera, cuero, empaques compuestos (tetrabrik), metales (latas, etc).
No aprovechables	Negro	Papel encerado, metalizado, cerámicos, colillas de cigarro, residuos sanitarios (papel higiénico, pañales, paños húmedos, entre otros).
Orgánicos	Marrón	Restos de alimentos, Restos de poda, hojarasca.
Peligrosos	Rojo	Pilas, lámparas, luminarias, medicinas vencidas, empaques de plaguicidas y otros.

Nota. Tomado de NTP 900.58, 2019, p. 12

2.2.1.2. Planta de compostaje

El Ministerio de Desarrollo Social de Chile indicó en 2013 que la planta de compostaje es un establecimiento de valorización en el que los desechos

orgánicos son reciclados y convertidos en compost, un producto que favorece la mejora del suelo. Esta metodología puede implementarse tanto con maquinaria especializada y dispositivos mecanizados como de manera manual, en función del volumen de desechos a tratar (p. 9).

Figura 4. *Modelo de planta de compostaje en Chile*



Nota. Ministerio de Desarrollo Social (p. 9, 2013)

El compost es un producto final que se produce a través de un proceso de compostaje, que consiste en descomponer desechos sólidos orgánicos, tales como excrementos de animales o plantas. Es un abono natural provechoso para el desarrollo de las plantas (Hussain et al., 2022, p.23).

El compostaje, según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se refiere a la degradación biológica de desechos sólidos biodegradables bajo condiciones mayoritariamente aeróbicas hasta alcanzar un estado que sea lo suficientemente estable para ser almacenado y manejado sin inconvenientes, y lo suficientemente desarrollado para ser usado de manera segura en la agricultura (Saha y Handique, 2023, p. 601). Además, la tecnología de compostaje de RSU puede ser la más sencilla y lucrativa para reemplazar la fracción orgánica de RSU (Abdel-Shafy y Mansour, 2018). Es la técnica más efectiva para la fracción orgánica de los Residuos Saludables Biodegradables, tales como los desechos de patio/jardín (que incluyen una considerable cantidad de productos de lignocelulosa que solo pueden degradarse bajo condiciones anaeróbicas) (Singh et al., 2022, p.575).

Los desechos orgánicos incluyen desechos alimenticios biodegradables provenientes de la industria de la alimentación, Los desechos municipales, los lodos de depuradoras, la Industria del jardín y los hogares privados. En otras palabras, se produce un elevado Volumen de residuos orgánicos provenientes de plantas, animales y actividades industriales donde la porción significativa no se emplea (Pandey et al., 2022, p.1).

Figura 5. *Residuos útiles para el proceso de compostaje*



Nota. Ministerio del Ambiente.

Parte 3: Reciclaje y disposición final segura de Residuos Sólidos. p. 88

Compostaje en ecosilos

Un ecosilo es un gestor de residuos orgánicos, ubicado en cavidades cilíndricas excavadas en la tierra, donde se acumula material orgánico proveniente de residuos alimenticios, poda de pasto, hojas secas, huesos, entre otros. El sistema necesita tener dos ecosilos para cambiar de uso. El proceso de compostaje concluye en el segundo. Por lo tanto, cada semestre se produce una recolección de abono orgánico de gran valor (MINAM, p. 85).

Figura 6. *Materia orgánica dentro de ecosilos*



Nota. Ministerio del Ambiente.
Parte 3: Reciclaje y disposición final segura de Residuos Sólidos. p. 85

Los residuos orgánicos, especialmente los provenientes de cocinas, comedores y mercados, pueden emplearse en la producción de compost tratado en instalaciones de compostaje (De boni et al., 2022, p.2).

Figura 7. *Compostaje en terreno*



Nota. Ministerio del Ambiente.
Parte 3: Reciclaje y disposición final segura de Residuos Sólidos. p. 86

2.2.1.3. Lombricultura

En términos básicos, la lombricultura se refiere al proceso de criar lombrices de tierra, mientras que el líquido que se filtra del lavado acuático de estas se conoce como vermiwash (Sulaiman y Mohamad, 2020, p.187).

La lombricultura representa un uso lucrativo y ecológico de las lombrices terrestres como biorreactores naturales para la administración de desechos, donde se emplea la interacción conjunta de estas con microorganismos asociados en el proceso de compostaje del sustrato orgánico. Incluye diversas enzimas como amilasa, lipasa, celulasa y quitinasa con el objetivo de desintegrar los residuos orgánicos en el terreno (Negi et al., 2022, p.2).

La lombricultura frecuentemente se ha enfocado en el cultivo de un grupo limitado de especies que habitan en la hojarasca, como *Eisenia fetida* (Savigny), *Dendrodrilus rubidus* (Savigny), *Dendrobaena veneta* (Rosa), *Lumbricus rubellus* (Hoffmeister), *Eudrilus eugeniae* (Kinberg), *Perionyx excavatus* (Perrier) y *Pheretima elongata* (Perrier), que poseen usos comerciales (como el de la hojarasca). Las especies que residen en la hojarasca son perfectas para programas de reproducción masiva gracias a sus elevados ritmos de crecimiento, maduración y reproducción. Además, estas especies son capaces de sobrevivir con relativa facilidad a densidades elevadas en medios orgánicos (sin la presencia de suelo mineral) (Lowe et al., 2023, p.581).

Las acciones de las lombrices de tierra promueven la dispersión del aire, agua y microorganismos a lo largo de todos los residuos en proceso de degradación. Después de que las lombrices de tierra ingieren residuos de biomasa, sus simbioses vinculados al intestino les asisten en la digestión de los materiales ingeridos. Luego, las lombrices de tierra excretan los residuos en forma de lombrices de tierra. Esta etapa activa de las actividades de las lombrices de tierra depende de las especies existentes, su densidad poblacional, el tipo de desechos de biomasa introducidos, la existencia o no de sustancias tóxicas y el flujo másico de elementos esenciales como el aire, los residuos y el calor en el interior del reactor (Santana et al., 2020, p.2).

Los microorganismos del intestino de las lombrices terrestres también intervienen en el proceso de descomposición a través de la generación de enzimas extracelulares que degradan la celulosa, la hemicelulosa, la lignina, los polipéptidos, los compuestos fenólicos, los lípidos y otros polímeros orgánicos en sus unidades monoméricas (Enebe y Erasmus, 2023, p.7).

Las lombrices terrestres habitan en los estratos superiores a una profundidad de 4-6 pulgadas (10-15 cm) en los residuos en proceso de degradación (Deepthi et al., 2021, p.2). Las lombrices de tierra son seres aeróbicos que necesitan oxígeno molecular para su respiración y metabolismo, razón por la cual suelen habitar en el entorno o en el suelo o en los residuos a una profundidad que promueve la propagación del oxígeno y su accesibilidad. Solo sobreviven en un entorno anaeróbico y frecuentemente fallecen o se desplazan debido a la tensión de oxígeno, según Yuvaraj et al. (2021, p.2).

Tras la migración de las lombrices de tierra de los residuos descompuestos a los nuevos elementos incorporados en los sistemas continuos, por ejemplo, el vermicompost dejado o los residuos de biomasa sin digerir experimentarán una degradación microbiana más intensa. Este procedimiento podría ser conocido como envejecimiento o desarrollo y durante la madurez, el vermicompost se distingue por su elevado contenido de nutrientes, una reducción de la población de microorganismos y acciones enzimáticas (Hanc et al., 2020, p.232).

2.2.1.4. Biochar

Mediante la Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos y en su informe de Valorización de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales, el Ministerio del Ambiente define al Biochar como la biomasa vegetal que se procesa mediante la pirólisis.

Usualmente, el biocarbón es visto como un producto que respeta el medio ambiente. En esencia, los biochars poseen un potencial energético del 30% superior al de la biomasa sin tratamiento. Además, en contraposición a la biomasa original, son extremadamente hidrofóbicos y pueden ser trasladados a grandes distancias sin la necesidad de tecnologías extra, lo cual repercute positivamente en la logística y la economía (Krysanova et al., 2022, p.6).

Krishnan et al. (2021, p.4) en su investigación indica que los materiales primarios utilizados para hacer biocarbón incluyen biomasa, desechos municipales, residuos de cultivos y estiércol animal. Estos materiales se fabrican a partir de biomasa lignocelulósica y no lignocelulósica. La biomasa lignocelulósica es un excelente biorrecurso de componentes vegetales y animales, incluidos los residuos agrícolas y madereros, los cultivos energéticos y los residuos sólidos urbanos (RSU).

Figura 8. Sistema de pirolizado y aplicación en un vivero municipal



Nota. Ministerio del Ambiente. Valorización de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales.

El biocarbón se genera como resultado secundario o subproducto en diversos procesos como transformaciones termoquímicas, tales como pirólisis, gasificación, torrefacción y carbonización hidrotermal de biomasa carbonosa a altas temperaturas (300-900 °C) y bajo condiciones restrictivas de O₂ (Daful y Chandraratne, 2020, p.370).

Pirolisis. La tecnología de pirólisis resulta muy apropiada para transformar biomasa con un contenido reducido de humedad, cuando el biocarbón o la producción de material de carbono es el producto final, lo que implica que la humedad en la materia prima puede tener un impacto considerable en la distribución de los productos. Además, cuando se incrementa el contenido

de agua, el rendimiento del biocarbón se reduce debido a la reacción de gasificación y reformado del vapor (Yang et al., 2023, p.3).

Gasificación. La gasificación es un procedimiento notable que convierte los materiales sólidos con carbono en un gas denominado gas de síntesis (que incluye principalmente CO, CO₂, H₂ y CH₄), biocarbón, cenizas y alquitranes, todo ello bajo la acción de un agente gasificante a elevadas temperaturas. El procedimiento de gasificación es un recurso relevante para transformar desechos en energía, favoreciendo una mayor recuperación de energía y eficiencia. Las fases de secado, pirólisis, combustión y reducción son esenciales en el proceso de gasificación (Tezer et al., 2022, p.8).

De acuerdo con Tian et al. (2022, p.2), generalmente, la gasificación de la biomasa incluye dos fases cruciales:

La primera fase consiste en desvitalizar los componentes de la biomasa para generar vapores volátiles y productos sólidos carbonizados (biocarbón).

La segunda fase consiste en transformar (craquear) estos vapores y el biocarbón en moléculas más reducidas para generar gases más estables.

Esta última fase juega un papel crucial en la velocidad de respuesta global del proceso, dado que presenta una velocidad de respuesta significativamente inferior y demanda una energía de activación superior a la etapa previa.

Torrefacción. El biocarbón tiene la capacidad de ser personalizado y perfeccionado mediante el procedimiento de torrefacción a baja temperatura. Este procedimiento gasta menos energía e incluso puede realizarse a través de la recolección de calor residual de calidad inferior. El estudio del biocarbón a baja temperatura ofrece un beneficio considerable en la formación de grupos funcionales. Además de la adsorción de poros, posee una potente habilidad para el intercambio de iones y la complejización de superficies con agentes contaminantes (Lin et al., 2023, p.11).

Carbonización hidrotérmica. El proceso de carbonización hidrotérmica (HTC) sucede a temperaturas de 180-250 °C bajo condiciones anaeróbi-

cas y en presencia de agua líquida. El HTC se distingue por su intenso efecto en la materia prima, generando un producto de carbono de excelente calidad, conocido como biocarbón, hidrocarbón o hidrocarbón. El HTC es un proceso parecido a la creación de carbón en la fauna, pero que progresa mucho más velozmente bajo condiciones más rigurosas. El biocarbón generado por este procedimiento se utiliza en una variedad extensa de tecnologías que no se restringen a propósitos energéticos (Krysanova et al., 2022, p.8).

2.2.2. Valorización energética

Orbegoso y Muller, (2019) sostienen que una operación de valorización energética puede llevarse a cabo mediante la utilización del biogás en los vertederos, el cual podría ser vinculado a la matriz energética nacional, aportando de esta manera al abastecimiento de energía de fuentes renovables (p. 18).

De esta manera, de las cinco medidas de mitigación que se contemplan en las NDC del sector de desechos sólidos, cuatro cuentan con financiación obtenida a través de deudas con JICA, BID y KfW, y se incluyen en los compromisos debido a este financiamiento garantizado. No obstante, para la puesta en marcha de la quinta medida de mitigación, que se refiere al uso de gas de relleno sanitario para su valorización energética, no se dispone de este financiamiento y se anticipa la llegada de inversiones privadas para su ejecución. Por otro lado, los compromisos para disminuir las emisiones se potenciarían y fortalecerían si dispongan de inversión privada, lo que incluso aceleraría la ejecución de los proyectos, ya que evitan una serie de procedimientos burocráticos que se deben realizar en casos de deuda o inversión pública. La inversión privada aumentaría los proyectos a llevar a cabo, lo que permitiría disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (Orbegoso y Muller, 2019, p. 18).

2.2.2.1. Conversión termoquímica

El tratamiento termoquímico de los desechos municipales está cobrando relevancia como la técnica más prometedora para convertir residuos en energía, principalmente por su sostenibilidad. Las investigaciones evidenciaron

que menos de 100.000m² de terreno bastan para manejar 1 tonelada métrica de desechos anuales durante 30 años, mientras que se requieren 3.000.000m² para almacenar en vertedero 30 toneladas métricas de residuos sólidos urbanos (Nandhini et al., 2022, p.8). El tratamiento termoquímico puede eliminar y usar de manera segura la concentración de contaminantes orgánicos e inorgánicos, sin presentar ninguna amenaza.

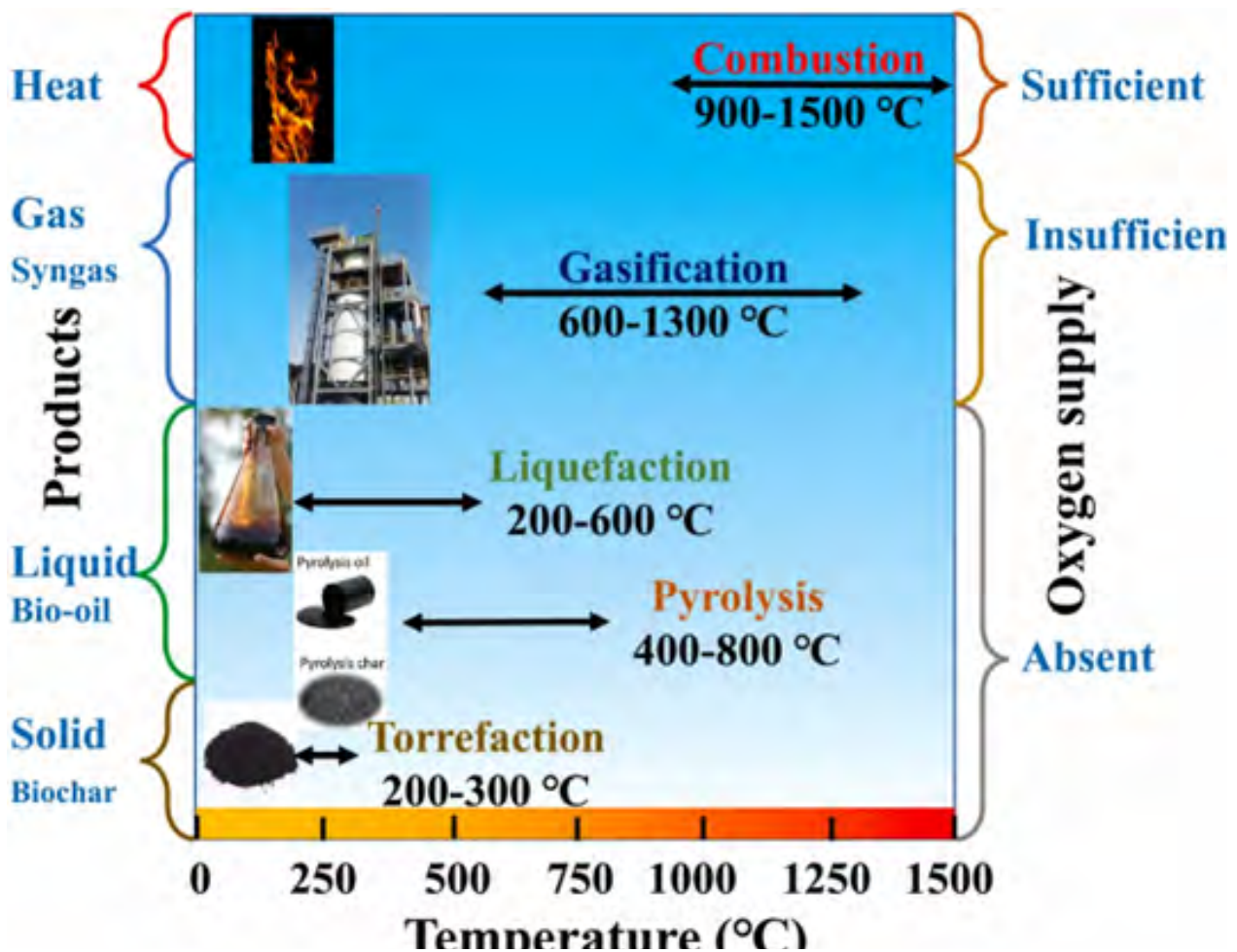
Los residuos derivados del proceso termoquímico, tales como las cenizas de fondo, los desechos sólidos y las escorias, ya sean metálicas o no metálicas, son reciclables y pueden ser reutilizados. Se reduce considerablemente la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, calculando que se recupera aproximadamente una tonelada de CO₂ en relación a los vertederos. Las investigaciones de valoración del ciclo de vida determinaron que la tecnología de transformación de desechos en energía posee un impacto reducido en el entorno y puede emplearse como recurso para la producción de energía. El calor y la electricidad derivados del proceso de tratamiento termoquímico pueden emplearse tanto en instalaciones industriales como para necesidades energéticas en viviendas o negocios (Saidi et al., 2020, p.1529).

2.2.2.1.1. Tecnologías de conversión termoquímica

Las técnicas termoquímicas proporcionan caminos que mitigan estos inconvenientes y disminuyen significativamente los subproductos indeseables al mejorar las condiciones de operación (Ong et al., 2020, p.4).

Los procesos termoquímicos como la combustión, gasificación, pirólisis, carbonización hidrotermal y torrefacción contribuyen a la fabricación de biocombustibles a partir de materiales de lignocelulosis y no lignocelulósicos. La Figura 9 sintetiza las condiciones operativas y los productos principales.

Figura 9. Esquema detallado de las técnicas de transformación termoquímica de biomasa



Nota. Extraído de Chen et al., (2021, p.5)

Torrefacción: La torrefacción es un procedimiento de pirólisis suave que se realiza sin oxígeno o en una atmósfera inerte a 200-300 °C (< 11 °C/s) en ausencia de aire a presión atmosférica con el objetivo de generar biocombustible con propiedades de combustible superiores (Manya et al., 2020, p.3). La biomasa sólida torrefacta posee un alto poder calorífico, un bajo contenido de humedad y otras características como la molienda y la hidrofobicidad. La meta de la torrefacción es generar combustible sólido como sustituto del carbón y crear materiales con elevada resistencia al agua (Chen et al., 2021, p.6).

También se menciona la torrefacción como un procedimiento de pretratamiento térmico en la producción de biocarbón con el objetivo de incrementar la densidad energética, y se emplea como insumo de baja humedad para generar energía. La torrefacción puede ser suave, suave o intensa

dependiendo de la temperatura de entrada necesaria para ingerir el contenido lignocelulósico de la biomasa (Yadav et al., 2022, p.323).

La biomasa torrefacta tiene propiedades físico-químicas que se encuentran en la línea intermedia entre las materias primas de biomasa y el carbón. El proceso de torrefacción, comúnmente utilizado para eliminar la humedad de la biomasa y densificarla, disminuye el costo de su transporte y potencia el poder calorífico de la biomasa (Benis et al., 2020, p.2).

Durante el proceso de torrefacción, los productos pueden presentarse de tres maneras y la mayoría de estos pueden ser empleados como combustibles. Algunos de los productos que se obtuvieron durante la torrefacción incluyen H₂, CO₂, tolueno y benceno (reacción gaseosa); H₂O, ácidos acéticos, alcoholes, aldehídos y cetonas (reacción líquida); y carbón y ceniza (reacción sólida) (Mamvura y Danha, 2020, p.3).

Pirólisis: La biomasa tiene la capacidad de transformarse en combustibles líquidos, como bioaceite, biodiésel y bioetanol, a través de procesos como pirólisis, transesterificación y fermentación, en correspondencia. En la técnica de pirólisis, los residuos se descomponen térmicamente con un abastecimiento limitado de aire u oxígeno a 300-600 °C, con el objetivo de producir energía en forma de combustible, biocarbón, gas de síntesis y precursores de biocombustibles. El proceso de pirólisis es irreversible; los materiales que se exponen a este proceso están constantemente expuestos a modificaciones en su composición física y química (Mamvura y Danha, 2020, p.7).

El proceso de pirólisis posee una extensa variedad de usos en el sector químico para la generación de metanol, biocarbón y carbón activado, con la única restricción de la liberación de gases perjudiciales que provocan impactos negativos en el entorno (Hasan et al. 2021, p.2). El biocarbón generado mediante pirólisis contribuye a la adsorción y se emplea en la purificación de metales pesados, la optimización del terreno y la captura de carbono (Shahbaz et al., 2021, p.2). El aceite pirolítico, un producto combustible de la pirólisis, se distingue por su alto contenido de agua y oxígeno, una elevada acidez con un pH de 2 a 4, una baja presión de vapor, una viscosidad elevada, una estabilidad limitada y un bajo poder calorífico (16-19 MJ/Kg) (Kan et al. 2020, p.5).

Los vínculos de los hidrocarburos se desintegran térmicamente para generar bioaceite en una escala de temperatura de 400 a 800 °C. La pirólisis puede tener una velocidad lenta, intermedia, rápida, asistida por microondas, entre otros. El biocarbón y el bioaceite son los productos clave en el proceso de pirólisis lenta y rápida, respectivamente (Chen et al., 2021, p.2).

- **Pirólisis lenta:** se caracteriza por una temperatura baja (300-550 °C), velocidades de calentamiento lentas (0,1-0,8 °C/s) y un periodo de contacto extendido (5-30 min o incluso 25-35 h) (El-naggar et al., 2019, p.2). La pirólisis lenta incrementa las producciones de biocarbón al fomentar las reacciones secundarias, alcanzadas a través de largos periodos de almacenamiento de vapor. La pirólisis lenta genera la carbonización tanto primaria como secundaria (Das et al., 2021, p.2).

- **Pirólisis intermedia:** la respuesta es más veloz que la pirólisis rápida, aunque más pausada que la pirólisis lenta. Sucede entre 450 y 550 °C, tiene una mayor rapidez que la pirólisis lenta, toma entre 10 y 30 s para finalizar y genera menos carbón que la pirólisis lenta (Ge et al., 2021, p.1); La quimiosíntesis de pirólisis intermedia a temperaturas correctas previene la formación de alquitranes de gran peso molecular y genera una diversidad de características del producto (biocarbón, bioaceite y gases) (Sakhiya et al., 2020, p.253).

- **Pirólisis rápida:** se distingue por altas temperaturas, rápidas velocidades de calentamiento (10-1000 °C /s) y cortos periodos de residencia (0,5-2 s) (Tomczyk et al., 2020, p.191). La pirólisis rápida previene reacciones secundarias al emplear breves periodos de almacenamiento de vapor y mantener elevadas temperaturas de calentamiento de la biomasa (Mutsengerere et al., 2019, p.328). La asignación de los subproductos se establece por la composición de la biomasa, la rapidez de calentamiento y la temperatura ambiente. Si el propósito principal es producir gas, la temperatura máxima puede llegar a los 1000 °C (Ge et al., 2021, p.2).

- **Pirólisis flash:** tiene como objetivo perfeccionar la fabricación de bioaceite. Se establece mediante elevadas temperaturas, calentamiento acelerado (> 1000 °C/s) y breves periodos de contacto ($< 0,5$ s). La pirólisis

flash genera en su mayoría productos parecidos a los de la pirólisis rápida. Entre 800 y 1000 °C se eleva. Usualmente, se necesitan partículas nutritivas de biomasa de excelente calidad ($< 0,2$ mm) (Gaurav et al., 2020, p.3).

- **Pirólisis asistida por microondas:** es una innovación relativamente reciente que se estudió al principio como un método eficaz para recuperar y transformar energía de desechos uniformes (Amalina et al., 2021, p.2). La pirólisis asistida por microondas ofrece múltiples ventajas frente a la pirólisis convencional, entre ellas el calentamiento homogéneo en todo el equipo, una rapidez en el calentamiento, y un calentamiento volumétrico y selectivo. El uso de microondas para calentar facilita el proceso con un control rápido de encendido/apagado y mejora la producción de productos y la calidad (Xiang et al., 2020, p.2).

Gasificación y combustión: La gasificación de la biomasa (un componente de la transformación termoquímica), se considera el método más interesante para la transformación de biomasa gracias a su habilidad para manejar una diversidad de materias primas provenientes de la biomasa y desechos, tales como la madera, los lodos, los residuos agrícolas y de cultivos. El mercado principal de gasificación llegó a los \$ 98.2 mil millones en 2020 y se anticipa un incremento moderado a lo largo de todo el período previsto (2021-2026) (Mishra y Upadhyay, 2021, p.343).

El proceso de gasificación de la biomasa es un procedimiento termoquímico donde la biomasa sólida se somete a una cantidad restringida de medio gasificante con el objetivo de transformarla en gases útiles como el metano (CH_4), el Dióxido de carbono (CO_2), el Monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2) y un residuo sólido conocido como char (Ren et al., 2019, p.2). Los gases tienen la capacidad de transformarse en combustibles líquidos mediante el procedimiento F-T, que genera calor y energía para las unidades de producción de energía (Molino et al., 2018, p.811).

En la tecnología de combustión, el calor es el recurso primordial y el desempeño se basa en la materia prima, el dispositivo de gasificación y la temperatura (750-1500 °C). Gran parte de los desechos sólidos pueden ser tratados

a través de la combustión. Aparte de la generación de energía eléctrica, la combustión también se emplea para el secado, el precalentamiento y la producción de vapor en el sector industrial. Los materiales compuestos por carbono, como el carbón, son principalmente empleados en la generación de energía, liberando una considerable cantidad de CO₂ al entorno natural (Chan et al., 2019, p.227).

La Tabla 3 presenta las cantidades de calor de varios agentes gasificantes. El aire presenta un valor calorífico inferior a causa de la dilución (nitrógeno) presente en él.

Tabla 3. *Calor del gas de síntesis generado mediante la gasificación de biomasa para diversos métodos de gasificación*

Ruta	Medio	Tipo de biomasa	Poder calorífico (MJ/kg de biomasa)
Gasificación	Oxígeno	—	15–17
	Aire	Lodos	8.02
	Vapor	Bambú	18
	SCW (en inglés)	Múltiples materias primas	41.6–61.6

Nota. Tomado de (Mishra y Upadhyay, 2021, p.343).

El dispositivo de gasificación se segmenta en varias áreas: áreas de secado, pirólisis, combustión y reducción.

- Zona de secado: Usualmente, se aconseja biomasa con un porcentaje de humedad del 10% al 20% para la fabricación de gas de síntesis de alta eficiencia calorífica (Ren et al., 2019, p.6).
- Zona de pirólisis: Así pues, la pirólisis de biomasa sucede en un espectro de temperatura de 398 a 773 K, generando diversos productos en función de la elección de la temperatura (Wang et al., 2020, p.4).
- Zona de combustión/oxidación: El método de combustión representa el método más sencillo y directo para el tratamiento de la descomposición de la biomasa (Ge et al., 2025, p.3). En el área de combustión, ocurren reacciones químicas exotérmicas que elevan la temperatura entre 1373 y 1773 K (Mishra y Upadhyay, 2021, p.329). En esta área, se generan CO,

CO₂, H₂ y H₂O, y el calor liberado se emplea para secar parcialmente los componentes y parcialmente durante el proceso de pirólisis (Zhang et al., 2017, p.109).

- Zona de reducción: La zona de reducción recibe este nombre debido a que disminuye las partículas de alquitrán en el gas generado al elevarlas a una temperatura elevada cercana a 1273 K.

Licuefacción: La licuefacción es un procedimiento termoquímico donde la biomasa es sometida a complejas reacciones químicas en un medio disolvente para generar en su mayoría productos líquidos (biooil o biooil). El proceso de licuefacción hidrotermal emplea agua como medio de reacción, y se realiza en agua sub/supercrítica (200-400 °C) con presión adecuada para licuar la biomasa para la elaboración de biopetróleo (Zhang et al., 2019, p.193).

Tabla 4. *Tipos de procesos de conversión termoquímica*

Ruta	Temperatura (K)	Presión (MPa)	Productos principales
Torrefacción	503–573	0.1	Combustibles sólidos
Licuefacción	523–603	5–20	Bio-aceites, Gases
Pirólisis	573–873	0.1–0.5	Bio-aceites, Combustibles para el transporte
Gasificación	773–1573	≥0.1	Syngas
Combustión	973–1673	≥0.1	Calor, Electricidad

Nota. Tomado de (Mishra y Upadhyay, 2021, p.343).

2.2.2.1.2. Condiciones y parámetros de operación

La composición del producto generado por los procedimientos de tratamiento termoquímico está fuertemente determinada no solo por las características de la materia prima, sino también por diversos parámetros de operación. Los factores de operación comprenden la temperatura, tamaño de partícula, velocidad de calentamiento, la clase de reactor y el tiempo de residencia.

- Temperatura: La temperatura tiene un rol crucial en el desempeño del tratamiento térmico y la composición del producto varía considerablemente dependiendo de la temperatura (Atimtay y Yurdakul, 2020, p.1292).

- Tamaño de partícula: Los tamaños de los residuos sólidos no se reparten de manera uniforme y deben ser reducidos a la uniformidad y al tamaño ideal para conseguir los mejores resultados en los reactores. El tamaño reducido de las partículas proporciona una superficie más amplia y las partículas se involucran de manera activa en una transferencia de calor y masa más eficiente (Mishra y Upadhyay, 2021, p.7).
- Velocidad de calentamiento: La rapidez de calentamiento tiene un impacto significativo en el desempeño de todos los procesos térmicos y termoquímicos, especialmente en el rendimiento del carbón, la capacidad calorífica de los productos derivados de combustibles y alquitrán durante el proceso de pirólisis (Liu et al., 2020, p.3).
- Tipo de reactor: La selección del reactor se basa en la materia prima (características físicas y químicas), el volumen de producción y los parámetros de operación. Los parámetros de operación de cada reactor pueden cambiar dependiendo de la composición química y las características físicas de la materia prima (Raheem et al., 2020, p.54).
- Tiempo de residencia: Los largos periodos de residencia proporcionan un mayor tiempo de interacción con las materias primas, el catalizador y otros componentes implicados en el proceso de tratamiento. No obstante, la reducción derivada de la velocidad durante las operaciones continuas puede provocar efectos de inhibición (Agu et al., 2019, p.3).

Además, se pueden llevar a cabo las operaciones de valorización material de los desechos sólidos municipales siguiendo las directrices de Orbegoso & Muller (2019), estableciendo plantas de valorización de residuos orgánicos: plantas de compostaje y centros de recolección.

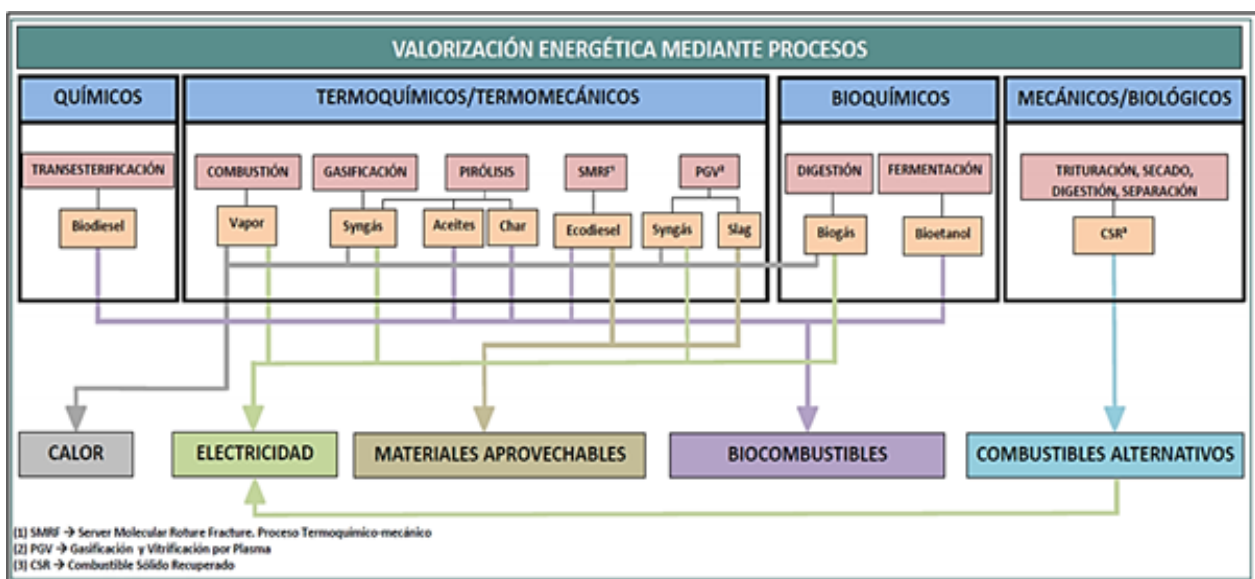
2.2.2.2.2. Conversión mecánica y física

La transformación mecánica y física de los residuos sólidos (RSU) en combustibles derivados de desechos (CDR) y combustible sólido recuperado (CSR) es una tecnología avanzada que puede manejar una diversidad de tipos de RSU y posiblemente sustituir los combustibles convencionales como el carbón (Karpan et al., 2021, p.655). Algunos ejemplos de conversión mecánica y

física son: el proceso de separación de elementos, disminución mecánica (en este punto se disminuye el volumen de los desechos), disminución mecánica (en este punto se disminuye la magnitud de los desechos).

No obstante, el reto principal en este camino radica en que las características del producto fluctúan con la materia prima y pueden contener contaminantes perjudiciales, como metales pesados, si no se eliminan correctamente antes de suministrar alimento a la planta. A pesar de que el procedimiento se percibe como de alto consumo energético, dado que demanda un volumen considerable de energía para clasificar, triturar y comprimir los RSU, no genera un efecto notable en el medio ambiente durante la producción y disminuye la carga del vertedero. No obstante, en las plantas de energía térmica, se generan emisiones considerables, aunque el reemplazo del carbón por CDR puede reducir las emisiones en aproximadamente 2,25 kg de CO₂/kg de carbón (Karpan et al., 2021, p.65).

Figura 10. Valorización energética mediante procesos químicos, termoquímicos, termomecánicos, bioquímicos, mecánicos y biológicos



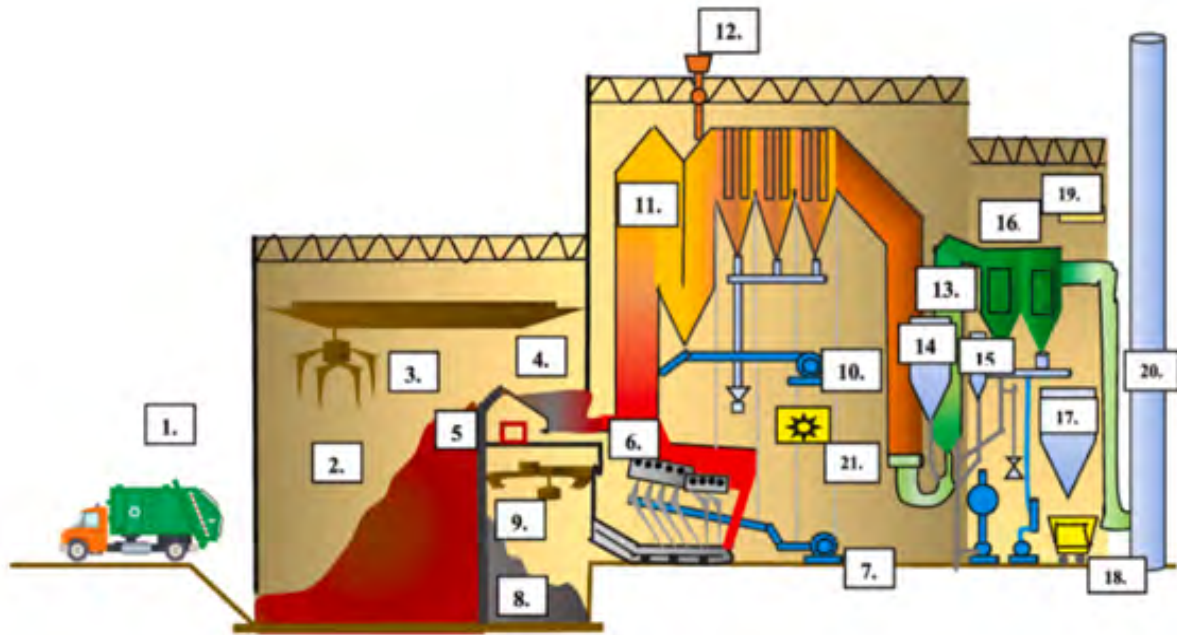
Nota. Fernández – González, J., 2014.

2.2.2.3. Planta de incineración

Por lo general, una instalación de incineración de desechos se refiere a un dispositivo destinado a la transformación térmica de desechos que pueden o no estar sujetos a un sistema de valoración energética (Sebastian y Paul, 2021, p.315).

El proceso de incineración consiste en la oxidación de materiales inflamables en los desechos. La Figura 11 muestra los elementos de la planta de incineración de desechos sólidos urbanos para la limpieza de gases inflamables (Sharma et al., 2021, p.2).

Figura 11. Componentes de una planta de incineración de residuos sólidos urbanos



Nota. Sebastian y Paul, 2021, p.315

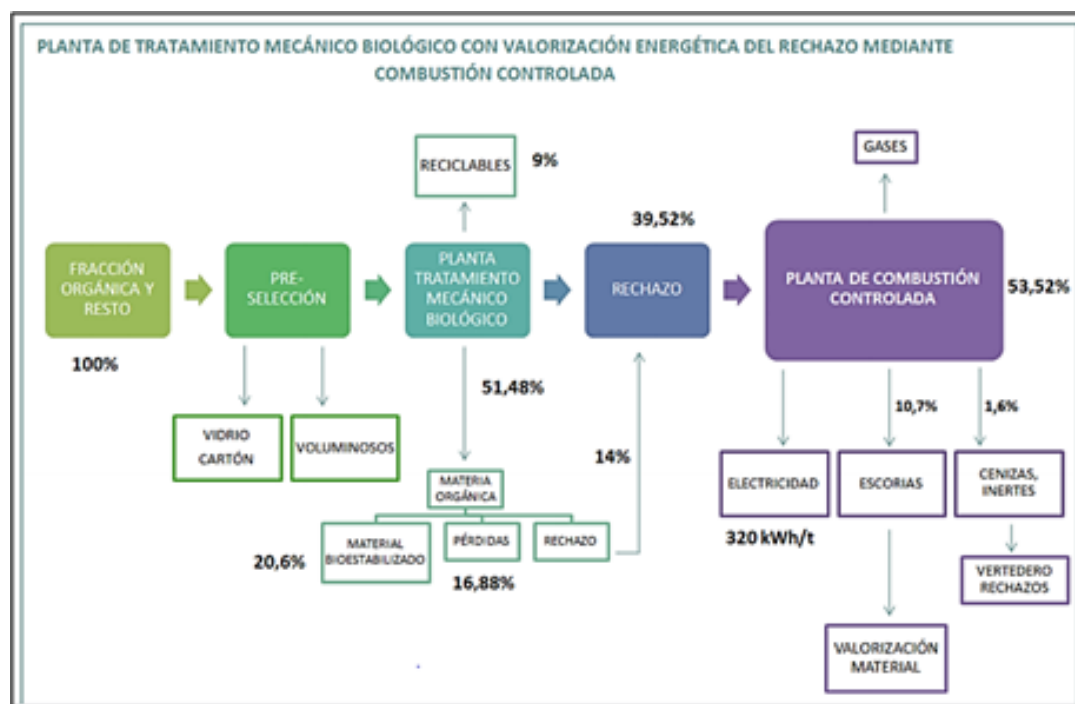
Entrega de residuos [(1.) Sala de volquetes (2.) Depósito de residuos (3.) Grúa de residuos (4.) Conducto de alimentación de residuos], Incineración [(5.) Alimentador de carnero (6.) Rejilla de incineración (7.) Ventilador de aire primario (8.) Depósito de cenizas de fondo (9.) Grúa de cenizas de fondo (10.) Ventilador de aire secundario (11.) Caldera de vapor (12.) Valor de seguridad de la caldera], Limpieza de gas combustible [(13.) Reactor de gas combustible (14.) Cal hidratada (15.) Carbón activado (16.) Filtro grande (17.) Silo de residuos (18.) Ventilador de identificación (19.) Sistema de control de emisiones (20.) Pila], Recuperación de energía [(21.) Turbina/generador de vapor)].

Las instalaciones de incineración operan con vapores de alta temperatura de ~850-900 °C para producir energía a partir de plásticos residuales, que posteriormente se emplea como energía térmica en el sistema de calefacción urbana o se convierte en energía eléctrica (Tan et al., 2014, p.704).

Las instalaciones que emplean la generación conjunta de energía térmica junto a la producción eléctrica pueden alcanzar el 80% de las eficiencias máximas, mientras que la producción de electricidad por sí misma puede llegar al ~20% de la eficiencia máxima. La liberación de contaminantes perjudiciales para el medio ambiente como el cloruro de hidrógeno, el óxido de nitrógeno, el monóxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno, el dióxido de azufre, el carbono orgánico, los radicales de metales pesados y el carbono orgánico junto con la emisión de gases de efecto invernadero, constituye el principal problema gordiano en el proceso de incineración, dado que los productos previamente mencionados tienen un impacto (Ashworth et al., 2014, p.120).

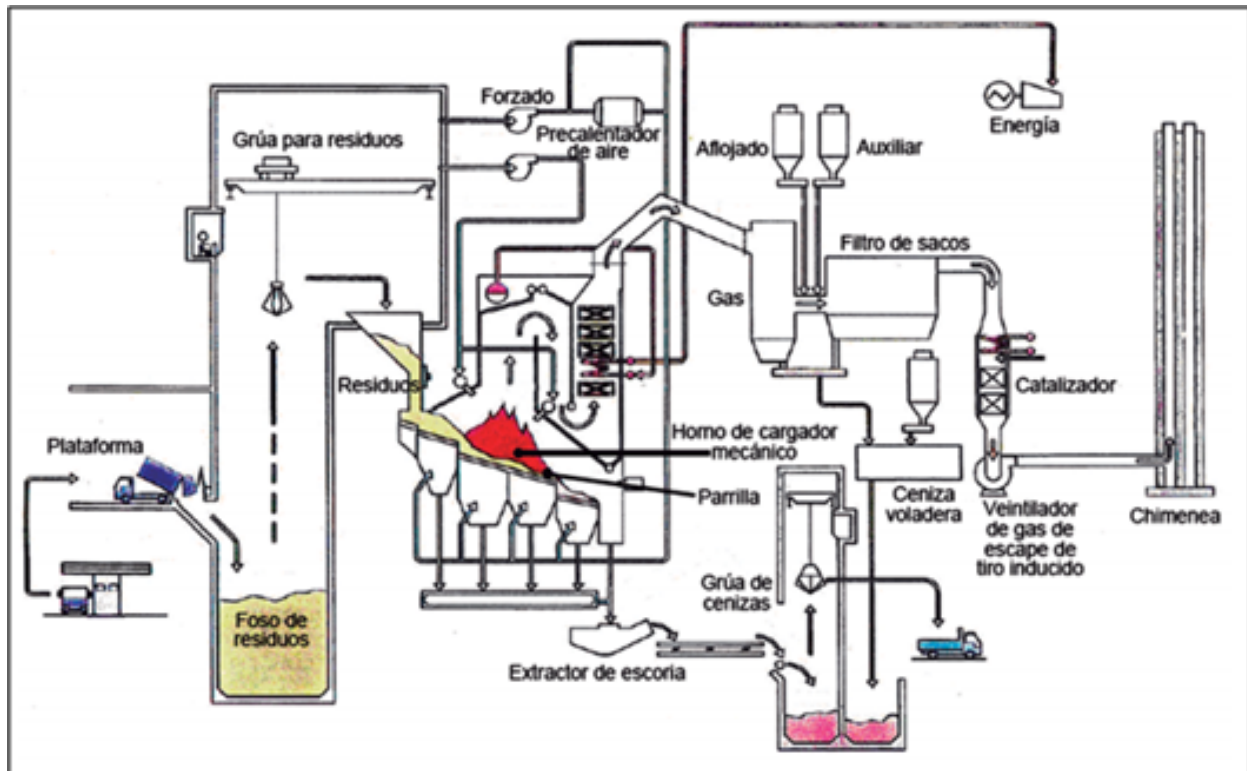
De acuerdo con el tipo de horno de combustión empleado, se puede distinguir entre: incineración en horno de parrilla, incineración en horno rotativo, o incineración en lecho líquido. Como se visualiza en la figura 12.

Figura 12. *Proceso de incineración con recuperación de energía*



Fuente: Fernández y González, 2014, p.21

Figura 13. Esquema de una planta de incineración con recuperación de energía



Fuente: Fernández y González, 2014, p.21

De igual forma, Grau y Farré (2011, p.2), detallan en lo sucesivo los tres tipos de sistemas que se pueden utilizar.

a) Incineración en horno de parrilla

El horno de parrilla es un tipo de horno de incineración donde los desechos son trasladados a través de una estructura que varía. De igual forma, la parrilla cumple con las funciones siguientes:

- Progreso de los desechos: se logra mediante el movimiento de la parrilla y su ángulo de inclinación.
- Combinación de desechos: se logra a través del movimiento de cada uno de los componentes que componen la parrilla. Ocurre un giro y progreso de los desechos, lo que facilita su combinación y uniformidad.
- Impulsar la llama: el movimiento propicia la difusión de las brasas y, consecuentemente, la aceleración de la combustión.

Los distintos sistemas de parrillas se distinguen por cómo se traslada el desecho a través de las distintas áreas de la cámara de combustión. Cada uno

debe satisfacer las necesidades en la nutrición primaria del aire, la rapidez de transporte y la correcta combinación del desecho.

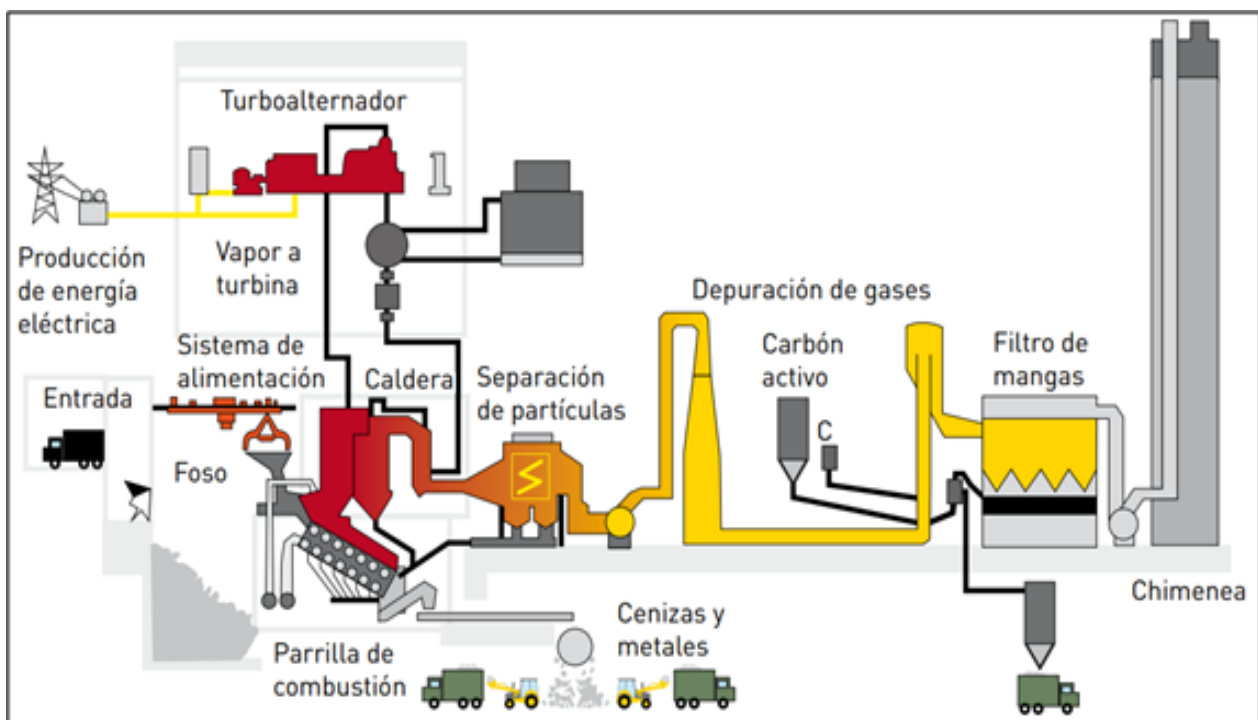
Para lograr una combustión adecuada, es necesario garantizar una adecuada distribución del aire de incineración dentro del horno. Por esta razón, se inyecta aire en diferentes lugares del horno, lo que cambia su función y su nombre:

- Primer aire: Es el que se administra mediante la parrilla y su función es funcionar como aire para la combustión.
- Atmosfera secundaria: Se suministra sobre el lecho de desechos para finalizar la combustión.

La incineración a través del horno de parrilla es la más amplia y desarrollada de todas las formas de incineración de desechos, debido a su habilidad para manejar una amplia gama de desechos sin requerir un pretratamiento previo. Solo se realiza una trituración antes de añadir al horno para disminuir la dimensión y homogeneizar el material combustible.

Respecto a sus restricciones de uso, la incineración en el horno de parrilla no es apropiada para partículas, líquidos o elementos que podrían fundirse en la parrilla (p 23).

Figura 14. Esquema de incineración en horno de parrilla

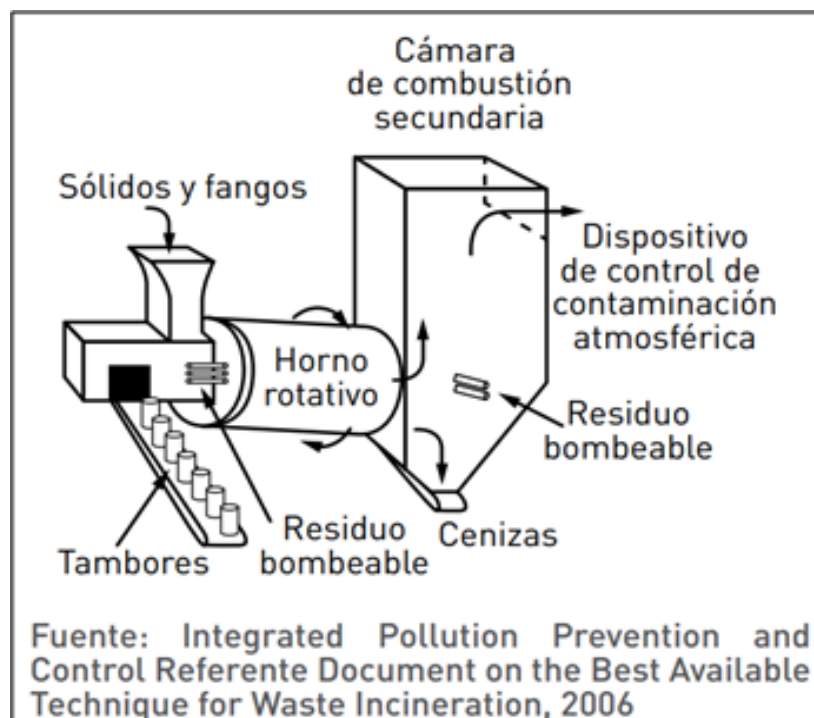


Nota. Grau y Farré, 2011, p. 23

a) Incineración en horno rotativo

La cámara primaria y la secundaria del incinerador de horno rotatorio se componen. La cámara primaria se compone de un tubo de forma cilíndrica inclinada con revestimiento de refracción. La rotación del cilindro sobre su eje permite el traslado de los desechos. En la cámara principal, se produce la transformación de una fracción sólida en gases mediante la volatilización, la destilación destructiva y las reacciones de combustión parcial. Es imprescindible la cámara secundaria para finalizar las reacciones de combustión en la etapa gaseosa. El clinker fluye hasta el final del cilindro. Un montón elevado de gases de combustión, un ventilador o un flujo de vapor proporcionan la descarga requerida. Las cenizas se desplazan por la rejilla, sin embargo, numerosas partículas se arrastran junto con los gases calientes. Los gases y partículas inflamables pueden ser quemados en un postquemador. Para controlar la contaminación atmosférica, los gases resultantes de la combustión también son tratados con depuradores de gases ácidos para eliminar tanto el ácido sulfúrico como las emisiones de ácido nítrico, y posteriormente se desplazan por cámaras de filtrado para eliminar las partículas antes de que el gas se libere a la atmósfera (Speight, 2020, p.391).

Figura 15. Esquema de horno rotativo de incineración

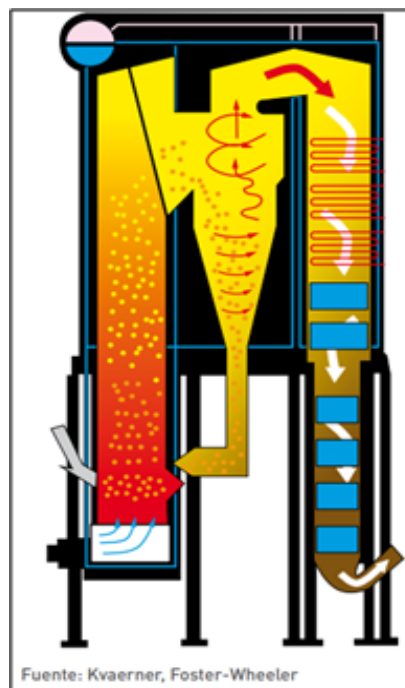


Nota. Grau y Farré, 2011, p. 23

b) Incineración en horno de lecho fluido

El incinerador de lecho fluidizado emplea un potente caudal de aire a través de un lecho de arena hasta que se llega a un punto donde las partículas de arena se separan para permitir el paso del aire, generando así un lecho fluidizado. A partir de este punto, se genera un lecho fluidizado y ahora es posible introducir combustible y residuos. La arena, junto con los desechos y/o el combustible pretratado, se mantiene suspendida en las corrientes de aire impulsadas, adquiriendo así un aspecto fluido. Así, el lecho se combina y se agita totalmente, preservando las minúsculas partículas inertes y el aire en una condición fluida. Esto posibilita que toda la cantidad de residuos, combustible y arena fluya totalmente por el horno. El calor generado por un incinerador puede ser empleado para producir vapor que posteriormente puede ser empleado para impulsar una turbina con el objetivo de generar electricidad. No obstante, la producción de energía se basa en gran parte en el tipo y la composición de los desechos empleados como sustancia prima. Gran parte del razonamiento contemporáneo sostiene que se combina una cantidad determinada de residuos con carbón para generar una cantidad constante de energía. No obstante, el procedimiento de incineración produce una serie de emisión, tales como (1) las cenizas de minerales y (2) la liberación a la atmósfera de gases de combustión (Speight, 2020, p.392).

Figura 16. Esquema de horno de lecho fluido circulante

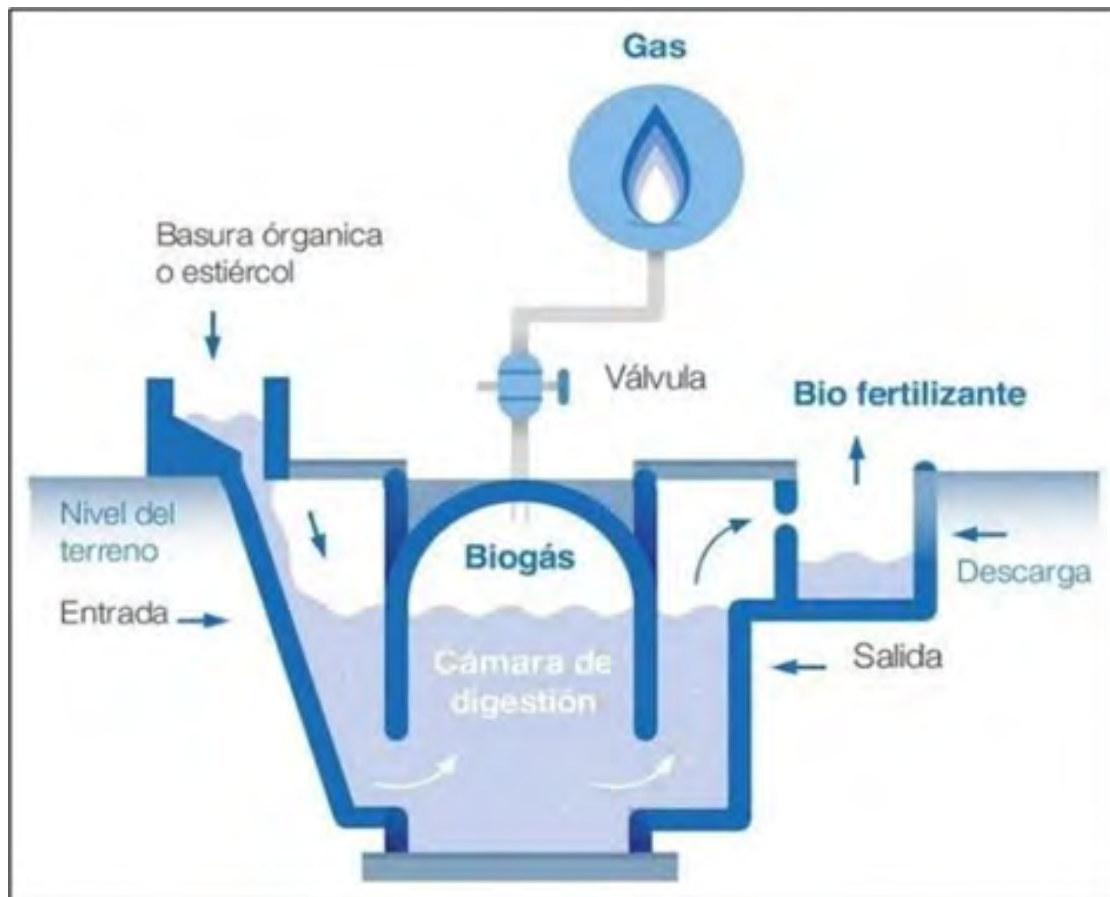


Nota. Grau y Farré, 2011, p. 24

2.2.2.4. Biometanización

El proceso de biometanización o digestión anaeróbica (DA) es una técnica biológica en la que los microorganismos anaeróbicos transforman el sustrato biodegradable en biogás, nutrientes y materia celular extra. El consorcio microbiano colabora en la descomposición de las estructuras de biomasa resistentes (como la lignocelulosa) en sus componentes esenciales. La materia prima compleja y no estéril tiene la capacidad de convertirse en biogás rico en energía mediante la Desalinización Atmosférica (Dar et al., 2021, p.1). Además, la biometanización representa una opción alentadora para incrementar el CH_4 presente en el biogás (Braga et al., 2020, p.1).

Figura 17. Esquema de obtención del biogás



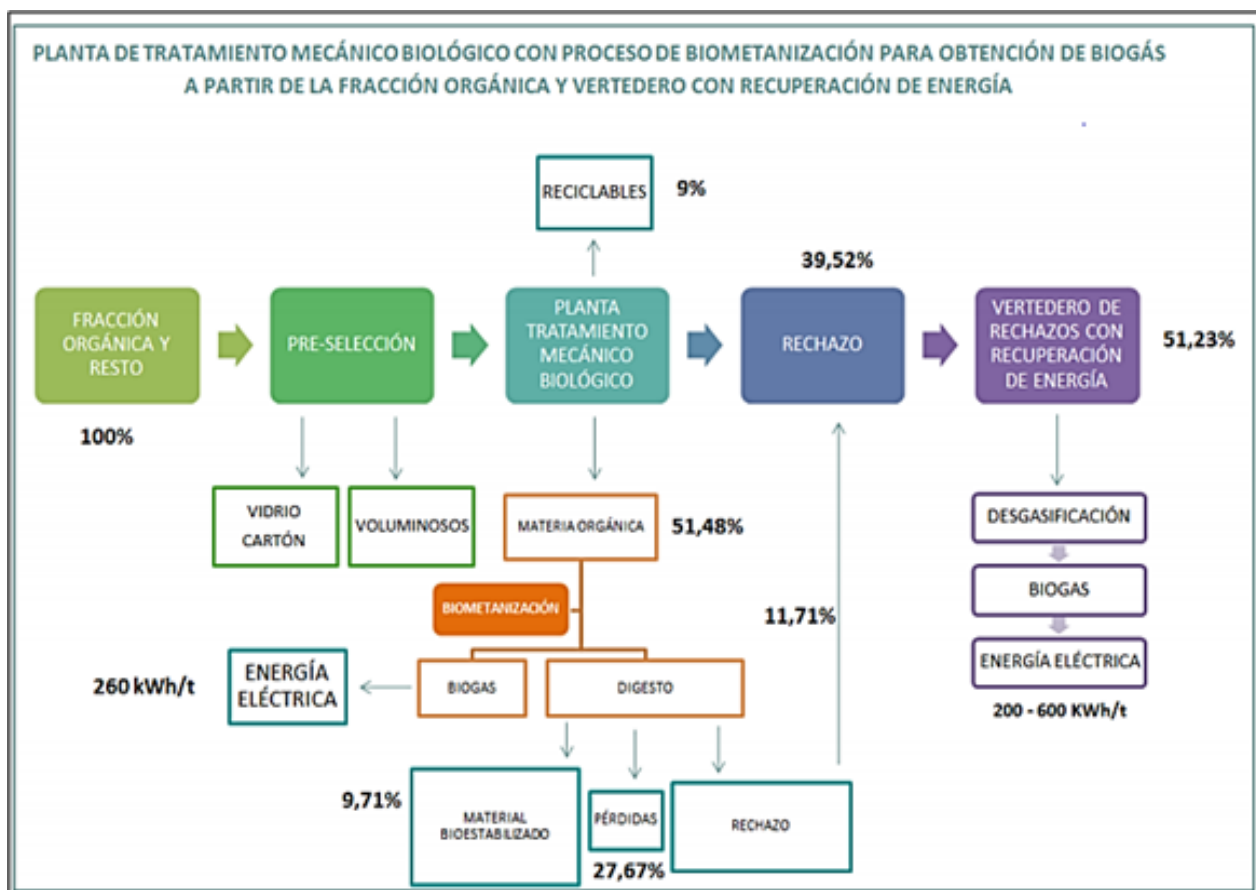
Nota. Ministerio del Ambiente. Valorización de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales

Centeno (2010, p.32), entre los diferentes métodos, indicaba que otra alternativa para el uso de los desechos municipales implica la biometanización de los residuos biodegradables a través de la fermentación anaerobia (sin

presencia de oxígeno), con el objetivo de generar un gas combustible, predominantemente formado por metano.

Una vez que el desecho ha sido suficientemente acondicionado y homogeneizado para alcanzar la hidrólisis, se suministra a los digestores donde se lleva a cabo la fermentación anaerobia. El biogás generado en estos se extrae a través de su parte superior y se depura para ser guardado en un gasómetro, desde donde se alimentan unos motores de producción eléctrica (Centeno, 2010, p. 33).

Figura 18. Proceso de biometanización para la obtención de biogás y recuperación de energía



Nota. Fernández y González, 2014, p.33

2.2.2.5. Desgasificación de vertederos

Centeno (2010, p.32) sostenía que la desgasificación de los vertederos antiguos resulta muy beneficiosa para ellos, dado que el componente principal de dichos gases es el metano. Este último, por un lado, posee un poder calorífi-

co adecuado para su uso energético y, por otro, si dicho metano se encuentra en la atmósfera, resultaría extremadamente dañino para el efecto invernadero (su actividad en este aspecto es 21 veces superior al CO₂).

El gas que se extrae del vertedero inicialmente se depura para eliminar impurezas que podrían perjudicar los equipos de valoración y, posteriormente, se suministra a motores de combustión interna que, unidos a alternadores, tienen la capacidad de producir energía eléctrica.

Además, se puede incluir el biogás, correctamente depurado y acondicionado, en las redes de distribución de gas, o emplearlo como combustible gaseoso en las flotas municipales de camiones y autobuses.

2.2.2.6. Gasificación

La gasificación de la biomasa representa otra alternativa con gran potencial para el uso de la biomasa residual, transformándola en un recurso energético de gran valor con una alta densidad energética mediante un procedimiento de alta temperatura (entre 500 y 1400 °C) (Chao et al., 2024, p.3.2).

La gasificación es un procedimiento termoquímico que transforma elementos carbonosos como la biomasa en una combinación de gases, denominada gas sintético (gas de síntesis), a través del uso de calor y un ambiente con escaso oxígeno. El gas de síntesis puede emplearse en la generación de electricidad, como combustible para motores y turbinas, así como en la elaboración de sustancias químicas y combustibles líquidos (Kundariya et al., 2021, p.1).

De acuerdo con los agentes de gasificación empleados, los procedimientos de gasificación de biomasa pueden clasificarse en gasificación por aire, gasificación por oxígeno, gasificación por vapor, gasificación por dióxido de carbono, gasificación por agua supercrítica, entre otros. Por lo general, los procesos de gasificación como la gasificación con oxígeno, gasificación con vapor, gasificación con dióxido de carbono y gasificación con agua supercrítica generan HHV superiores de gas de síntesis en comparación con los obtenidos por la gasificación con arcilla (Zhang et al., 2019, p.193).

Por lo general, los procesos de gasificación como la gasificación con oxígeno, gasificación con vapor, gasificación con dióxido de carbono y gasificación con agua supercrítica generan HHV superiores de gas de síntesis en comparación con los obtenidos mediante la gasificación con aire; no obstante, la gasificación por aire es el más estudiado y utilizado debido a que el agente de gasificación (aire) es económico, el proceso de reacción es sencillo y la estructura del reactor es sencilla. En el proceso de gasificación de biomasa utilizando vapor, dióxido de carbono o agua supercrítica, la reacción general de gasificación suele ser endotérmica y, por ende, se necesita un calentamiento externo a lo largo de todo el proceso. No obstante, en el proceso de gasificación de biomasa utilizando aire u oxígeno, la gasificación total puede ser endotérmica o exotérmica. Estas reacciones pueden ser reguladas o alteradas ajustando el nivel de aire u oxígeno. Por lo general, un porcentaje de aire u oxígeno específico coincide con una temperatura de gasificación determinada si no se suministra calor externo. Si se necesita o se proyecta una temperatura de gasificación superior, es necesario incorporar calor externo o se requiere un contenido de aire u oxígeno más elevado (Zhang et al., 2011, p.65).

El sitio en el que se llevan a cabo las reacciones de gasificación se denomina gasificador. Un gasificador juega un papel crucial en los procesos, reacciones y productos derivados de la gasificación. Por lo general, se pueden dividir los gasificadores en tres categorías principales: gasificadores de lecho fijo (o gasificadores de lecho móvil), gasificadores de lecho fluidizado y gasificadores de flujo arrastrado (Zhang et al., 273).

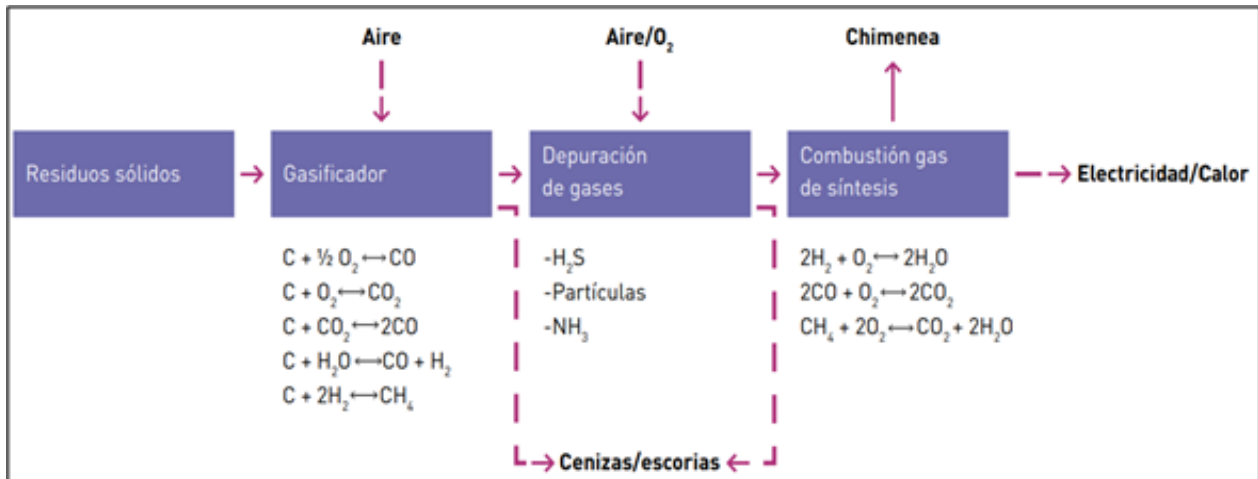
La Tabla 5 presenta las características más relevantes de los distintos gasificadores.

Tabla 5. *Características principales de los diferentes gasificadores*

Gasificador	Características
Cama fija	1. Pequeña capacidad (0,01–10 MW) 2. Puede manejar partículas grandes y gruesas 3. Baja temperatura del gas del producto (450–650 °C) 4. Alto contenido de partículas en la corriente de productos gaseosos 5. Alto consumo de agente de gasificación 6. Las cenizas se eliminan en forma de escoria o en seco 7. Puede dar lugar a un alto contenido de alquitrán (0,01-150 g/Nm³)
Lecho fluidizado	1. Capacidad media (1–100 MW) 2. Distribución uniforme de la temperatura 3. Mejor contacto gas-sólido 4. Alta temperatura de funcionamiento (1000–1200 °C) 5. Bajo contenido de partículas en la corriente de gas 6. Adecuado para materias primas con baja temperatura de fusión de cenizas 7. Las cenizas se eliminan en forma de escoria o en seco
Flujo arrastrado	1. Gran capacidad (60–1000 MW) 2. Necesita material de alimentación finamente dividido (< 0,1–0,4 mm) 3. Temperaturas de funcionamiento muy altas (> 1200 °C) 4. No apto para materias primas con alto contenido de cenizas 5. Demanda de oxígeno muy alta 6. Corto tiempo de residencia 7. Las cenizas se eliminan en forma de escoria 8. Puede resultar en un bajo contenido de alquitrán (insignificante)

Nota. Zhang et al., 2019, p.197

La gasificación es un método más ecológico en comparación con la incineración y la pirólisis, sin embargo, necesita el pretratamiento y la limpieza del gas de síntesis generado, lo que convierte la gasificación en un procedimiento complicado y costoso. Es indispensable que el gas producido esté exento de alquitrán, carbón y partículas. También se incrementa el costo de la gasificación mediante la utilización de catalizadores para optimizar las cantidades y la calidad del gas producido. Similar a la pirólisis, la gasificación resulta más efectiva para desechos uniformes como trozos de madera, neumáticos, papel, plásticos y cartón (Pratap et al., 2021, p.215).

Figura 19. Esquema de proceso de gasificación

Nota. Grau y Farré., 2011, p. 27

2.2.2.7. Termólisis

En la termólisis, los desechos son sometidos a temperaturas cercanas a 400 °C, en un reactor donde no existe oxígeno, a través de la utilización de energía externa (como la eléctrica). Bajo estas circunstancias, ocurre una destilación de los desechos, produciendo un gas combustible y un producto carbonado (coque), el cual puede emplearse como carbón activo o ser valorado como combustible (Centeno, 2010, página 34).

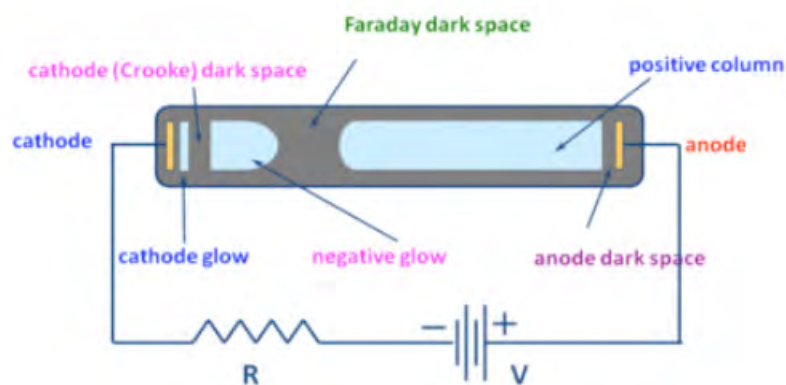
2.2.2.8. Procesos basados en la generación plasma

El plasma se genera cuando la energía entra en la fase gaseosa, generando una cantidad adecuada de portadores de carga (electrones libres e iones positivos). Las fuentes de plasma pueden categorizarse en función del tipo de energía que ingresa al gas y la presión de operación del gas (Sikarwar et al., 2020, p.4). Principalmente, los plasmas tecnológicos son producidos por descargas eléctricas en una atmósfera de gas. Según la conducta temporal del campo eléctrico de sustentación, las descargas se identifican como descargas de corriente continua y corriente alterna, operando de manera continua o pulsada (Patil et al., 2017, p.428):

- Descargas de corriente continua: El plasma de CC se produce cuando se enciende una descarga incandescente de baja presión en un conte-

nedor de descarga cerrado entre los electrodos internos (ánodo y cátodo). Como se ilustra en la Figura 12.1, la liberación en un contenedor cilíndrico de longitud presenta diversas áreas distintivas: desplome del cátodo, resplandor negativo, espacio oscuro de Faraday, columna positiva y desplome del ánodo. La zona de la columna positiva está relacionada con el plasma. El paso de la descarga incandescente a un arco se restringe al poner una resistencia de corriente limitante en la serie que conlleva la descarga.

Figura 20. *Esquema de una descarga de corriente continua*



Nota. Patil et al., 2017, p.428

- **Descargas de radiofrecuencia:** Normalmente, las descargas de plasma de rf funcionan en el espectro de frecuencia de $f = 1\text{--}100$ MHz. Las respectivas longitudes de onda ($\lambda = 3\text{--}300$ m) son considerablemente amplias en relación con las dimensiones del reactor. En frecuencias de baja frecuencia, los iones reaccionan al campo ejercido y chocan con la superficie del electrodo, produciendo electrones secundarios. No obstante, a frecuencias superiores, tanto los iones como los electrones no logran llegar a la superficie del electrodo durante la etapa de aceleración del campo eléctrico externo; por consiguiente, los portadores de carga se producen mediante la ionización debido al impacto de electrones de partículas de gran peso en el volumen de plasma.

- **Descargas de microondas:** Se compone de elementos MW como el magnetrón que produce MW, guías de onda apropiadas y otros elementos como un circulador y una carga ficticia refrigerada por agua que

facilita la transmisión hacia adelante de la potencia MW (la potencia reflejada se vierte en una carga ficticia refrigerada por agua), un acoplador cruzado que extrae la señal de la potencia directa y reflejada y se proporciona a los indicadores tras la rectificación, y un sintonizador de talón para la adaptación de la potencia.

- Plasma de resonancia de ciclotrón de electrones de microondas:

Los plasmas de resonancia de ciclotrón electrónico (ECR) se producen mediante la interacción entre la radiación de microondas y un campo magnético definido en un valor que provoca que los electrones en el plasma absorban la energía de microondas de manera resonante (Holber, 2000, p.67).

2.2.3. Gestión de residuos en vertedero

Se basa en la eliminación definitiva de los residuos sólidos de los vertederos mediante procedimientos hacia un espacio regulado con la finalidad de reducir el efecto negativo en el medio ambiente y la salud (Sughosh et al., 2025, p.329).

2.2.3.1. Vertedero y recuperación de gas

Los rellenos sanitarios incluyen atributos como fondos revestidos, sistemas para la recolección de lixiviados, supervisión de aguas subterráneas y sistemas para la recolección de gases, ya sean incendiados o transformados en energía, junto con tapas (Kale y Gokcek, 2020, p.3). Este ambiente regulado posibilita el enterramiento de los RSU con barreras sofisticadas que protegen el entorno durante muchos años, disminuyendo notablemente las emisiones perjudiciales en comparación con el derramamiento a cielo abierto. Alrededor del 37% de los RSU a nivel global son enviados a los vertederos, mientras que aproximadamente el 8% son procesados mediante sistemas de recuperación de gases (Kaza et al., 2018, p.32).

En contraste con los materiales geotécnicos naturales, los residuos sólidos de los vertederos sufren biodegradación, lo que provoca la generación de

gases y lixiviados, la emisión de calor, la compresión de desechos y su deformación. El gas bruto de vertedero contiene entre un 50 y 60% de metano, entre un 40 y 50% de dióxido de carbono y casi un 1% de gases traza provenientes de distintos elementos de los RSU (Duan et al., 2021, p.39).

El gas de vertedero, que representa cerca del 50% de metano, liberado por los vertederos, es uno de los principales factores que contribuyen a las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Erdogdu, 2025, p.1). El metano producido por los desechos orgánicos se captura para convertirse en energía (peng et al., 2023, p.765). Adicionalmente, el lixiviado, un subproducto que se distingue por su elevada demanda química de oxígeno (DQO) (100-70.900 mg/L) y una relación bioquímica de oxígeno (DBO)/DQO de 0,04-0,7, presenta una biodegradabilidad inferior en comparación con las aguas residuales municipales (Teng et al., 2021, p.6).

El proceso de recuperación de gases de vertedero es una técnica lucrativa y escalable para generar energía renovable y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (Talang y Sirivithayapakorn, 2021, p.5).

2.2.3.2. Vertido y quema a cielo abierto

La incineración de desechos y el vertido a cielo abierto son tácticas comunes para eliminar residuos. El vertido a cielo abierto y la incineración son métodos de manejo de residuos sólidos y peligrosos, particularmente en naciones de bajos ingresos, donde la mayoría de los desechos se gestionan de esta forma a causa de la ineficiencia de las normativas (Kaza et al., 2018, p.11).

La incineración a cielo abierto, el derramamiento de desechos en los ríos y otras acciones indebidas de manejo de residuos continúan siendo desafíos a los que se encuentran cuando no existen servicios de recolección de residuos (Ramadan et al., 2022, p.1633). Se abordan estratégicamente estos problemas en la comunidad local para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). No obstante, la ausencia de disciplina y dedicación del gobierno local y de la comunidad provoca que numerosas estrategias se desaceleren y se tornen ineficientes (Kristanto y Koven, 2019, p.2).

La administración de los desechos sólidos urbanos al ser reducida a través de la incineración, genera una disminución de peso (70-80%) y volumen (80-90%), y se emplea como energía eléctrica con una eficiencia eléctrica neta del 30% (Chan et al., 2019, p.227).

Una investigación ha revelado que cada tonelada de desechos produce 580 kg de cenizas en la incineración a cielo abierto y 0,444 m³ de lixiviados sin procesar en el vertedero a cielo abierto. Pese a que el calor puede disminuir la bioactividad y los olores y eliminar los causantes de enfermedades, los costos ambientales son significativos (Talang y Sirivithayapakorn, 2021, p.2).

CAPÍTULO III

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS NO MUNICIPALES

3.1. Generalidades

Los desechos del sector no municipal, también conocidos como residuos no municipales, son aquellos de naturaleza peligrosa y no peligrosa que surgen durante el desarrollo de actividades de extracción, producción y servicios. Incluyen los producidos en las instalaciones principales y secundarias del funcionamiento (Decreto Legislativo N° 1278, 2016).

La valorización es la opción de administración y manejo que debe tener prioridad en comparación con la disposición final de los desechos sólidos.

Se toman en cuenta operaciones de valorización: reciclaje, compostaje, reutilización, recuperación de aceites, bio-conversión, coprocesamiento, co-incineración, producción de energía mediante procesos de biodegradación, bio-char, entre otras opciones viables y acorde a la disponibilidad tecnológica del territorio.

Los productores del sector de la administración no municipal tienen la capacidad de llevar a cabo operaciones de valorización en relación a sus desechos sólidos (Decreto Legislativo N° 1278, 2016).

3.2. Operaciones de valorización material

Los residuos sólidos industriales (RSI) representan retos ambientales y económicos significativos debido a su gran volumen y posibles riesgos. Diversas actividades industriales, tales como la minería, la fabricación de químicos, textiles, el tratamiento de alimentos, la edificación y las plantas de energía, contribuyen a la producción de desechos sólidos industriales. Los desechos sólidos industriales pueden categorizarse en diversas clases, que abarcan residuos de riesgo, no riesgo, orgánicos e inorgánicos (Chen et al., 2025, p.1).

Los procesos industriales producen una variedad de desechos minerales, como escorias, cenizas, polvos y relaves, con la capacidad de reemplazar a las materias primas vírgenes de acuerdo al principio de economía circular. Desde la perspectiva regulatoria, los desechos pueden clasificarse como residuos, subproductos o productos; las definiciones difieren entre países. Algunos desechos pueden ser utilizados directamente en el proceso de producción como insumo, mientras que existen diversas alternativas de reciclaje, particularmente en el sector de la construcción y la agricultura (Sorvari y Wahlstrom, 2024, p.259).

Los desechos provenientes de las tareas de edificación y demolición comprenden una variedad variada de materiales, tales como cemento, ladrillos, madera, metales y otros materiales, originados en la edificación, renovación o demolición de estructuras (Purchase et al., 2021, p.76). Estos materiales para la construcción y demolición (C&D) se fusionan con mezclas complejas en el flujo de desechos (Kabirifar et al., 2020, p.2). De acuerdo con las estimaciones del sector, para 2025, la producción global de desechos de construcción y edificación superará los 2.200 millones de toneladas métricas (Malladi et al., 2025, p.2).

En relación con los desechos sólidos urbanos y los desechos orgánicos, se emplean varias técnicas de manejo de residuos. No obstante, los desechos no municipales se componen de una mezcla variada de sustancias tanto peligrosas como no peligrosas generadas por diferentes industrias (Lee et al., 2024, p.3).

Estos sectores producen desechos que abarcan una mezcla compleja de materiales categorizados como peligrosos, no peligrosos, inertes o no inertes (Kabirifar et al., 2020, p.1).

A escala global, la industria de la construcción contribuye con cerca del 30% de todos los desechos humanos, y más del 35% de los residuos de edificación y demolición se acumulan cada año en los vertederos (Purchase et al., 2021, p.76). Pero, las estrategias tradicionales de manejo de desechos han logrado ciertos avances, pero no han mitigado de manera efectiva los impactos de los residuos (Trivedi et al., 2023, p.2).

Algunos desechos minerales poseen una composición parecida a la de las materias primas utilizadas en la producción del cemento y tienen la capacidad de reemplazar a las materias primas naturales que se obtienen de las canteras: arcillas, calizas y esquistos, entre otras, reduciendo así la explotación de recursos naturales. Estos desechos minerales se incorporan a las demás materias primas antes de ser introducidos en el horno de cemento, en el segmento del proceso conocido como preparación del “crudo”, proporcionando calcio, hierro, silicio o aluminio, minerales esenciales para la producción del clínker (producto intermedio que emerge del horno y que al molerse se transforma en cemento) (Hidalgo, 2012, p. 3).

Es así que la legislación europea requiere que para 2030, los desechos idóneos para reciclaje, recuperación de materiales o valorización energética ya no puedan terminar en los vertederos (Serrano et al., 2025, p.1).

3.2.1. Reciclaje

Los métodos de recolección de desechos pueden diferir entre países. Los sistemas de recolección como las bolsas puerta a puerta, los contenedores en la acera, los puntos de entrega o los contenedores de desechos mixtos son variados y pueden adoptar métodos de recolección formales o informales (Yıldız-Geyhan et al., 2019, p.119). La mayor parte de las naciones europeas emplean recipientes etiquetados por colores en la acera para la recogida, donde los habitantes depositan sus desechos que han sido previamente separados. En España, los tipos de recipientes estándar son el amarillo para plásticos y latas; azul para cartón y papel; verde para el vidrio; marrón para desechos orgánicos/alimentarios; y gris/negro para los desechos no reciclables. Además de estos materiales, metales, cauchos y textiles son residuos habituales en los residuos sugeridos de uso comunitario (Soltanian et al., 2022, p.2).

El reciclaje y la valorización energética tienen como objetivo recuperar y utilizar el desecho o la energía obtenida en un ciclo de producción diferente. Así se disminuyen las cantidades de desechos que necesitan ser removidos, además, es una táctica que puede generar dos ventajas: disminuir la cantidad de

desechos que se almacenan en vertederos y vertederos a cielo abierto, mientras se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Arce-Bastias, 2022, p.3).

De acuerdo con FICHTNER – LKSUR, (2004, p. 111), la capacidad de reciclaje y valorización energética de un desecho se basa intensamente en el mercado existente o en el que se pueda crear para cada uno. Este mercado se encuentra afectado por:

- La necesidad de las industrias que reciclan RSI, que emplean determinados tipos de desechos como materiales en su fabricación.
- La economía a nivel local, regional e internacional, la relación relativa entre los recursos naturales y los desechos que pueden ser reciclados o valorizados para reemplazar a los primeros.
- Los gastos asociados a los sistemas de disposición final, dado que, si estos RSI no son reciclados o valorizados, se deben eliminar de algún modo, con su respectivo costo vinculado.

Es imprescindible reciclar y emplear de manera eficiente los desechos sólidos industriales a través de técnicas apropiadas de administración de residuos. Las tecnologías de reciclaje de desechos sólidos industriales comprenden materiales de metal, no metal, peligrosos y no peligrosos (Chen et al., 2025, p.1).

La estimación de los RSI se basa en el volumen de estos, ya que, existen numerosos desechos que podrían ser reciclados o utilizados energéticamente, sin embargo, se necesitan cantidades mínimas y estables en el tiempo para que su reciclado o valorización energética sea económicamente viable.

Tabla 6. *Prácticas aplicadas para reciclaje*

	Finalidad	Prácticas
Reciclaje	Cría de animales	Alimentos de cerdos
		Uso de residuos para cama de aves y caballos
	Mejorador del suelo	Adición de tierra de lana al suelo
		Compostaje
	Recuperación de materiales	Destilación de solventes
		Recuperación de cromo de curtiembres
		Recuperación de lanolina para la industria de cosméticos
	Uso de residuos como insumos	Producción de briquetas
		Utilización de RSI en ladrilleras
		Uso de papel como insumo
		Fundición de chatarra férrea
	Otros	

Nota. FICHTNER – LKSUR, 2004, p. 112.

Las técnicas de valoración de desechos, en particular las de reciclaje, son de gran importancia para el medio ambiente dado que su uso conlleva significativas ventajas ambientales.

Para llevar a cabo el reciclaje de desechos sólidos no municipales, es importante considerar que los generadores determinarán los tipos de desechos sólidos a guardar de forma distinta, dependiendo de su producción (NTP 900.58, 2019, p. 6). Todo esto se realiza mediante el código cromático establecido por INACAL mediante la NTP 900.58, tal como se ilustra a continuación.

Tabla 7. *Código de colores para los residuos del ámbito no municipal*

Tipo de residuo	Color
Papel y cartón	Azul
Plástico	Blanco
Metales	Amarillo
Orgánicos	Marrón
Vidrio	Plomo
Peligrosos	Rojo
No aprovechables	Negro

Nota. NTP 900.58, 2019, p. 13

3.2.2. Reutilización

El principal objetivo de la administración integral de los desechos sólidos en el país es prevenir o reducir la producción de residuos sólidos en su origen, en contraposición a cualquier otra opción. En segundo lugar, en relación con los desechos producidos, se favorece la recuperación y el aprovechamiento material y energético de los residuos, incluyendo la reutilización, reciclaje, compostaje, coprocesamiento, entre otras opciones siempre y cuando se asegure la salvaguarda de la salud y del entorno ambiental, siempre y cuando se asegure la salvaguarda de la salud y del medio ambiente (Decreto Legislativo N° 1278, 2016)

La reutilización de desechos sólidos, esencial en el proceso de incentivar una cultura ambientalista, se considera una experiencia restringida a la creación de opciones poco creativas. Sin embargo, la práctica de reutilización de residuos sólidos implica también un ahorro de recursos, una disminución en la utilización de energía, en los procesos productivos y, en última instancia, una racionalización en la utilización de los recursos (Osorio, 2016, p. 219).

3.3. Operaciones de valorización energética

El incremento en la necesidad de electricidad y la dependencia de la generación de energía tradicional basada en combustibles fósiles contradicen los objetivos presentes de disminuir la elevada huella de carbono de las fuentes de energía. La generación de energía tradicional constituye cerca del 26% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, y se proyecta que el uso global de energía se incremente en un 15% para el año 2050 (Apollon et al., 2025, p.47).

Tradicionalmente, la generación de energía a partir de desechos no municipales como mineros y minerales se ha enfocado en la recuperación de combustibles fósiles, como el limo de carbón de los residuos de carbón. Estas fuentes de combustible generan emisiones que añaden cargas al medio ambiente y pueden, en función de la evaluación del ciclo de vida completo, implicar un reaprovechamiento negativo de los residuos mineros (Mayes et al., 2022, p.409).

Así también, los desechos en el sector cementero podrían emplearse como combustibles alternativos y materia prima. Estas acciones ofrecerían una serie de significativos beneficios ecológicos (Cedano, 2013, p.7):

- Reducción en la explotación de los recursos naturales dado que se genera un ahorro en la utilización de materias primas y combustibles fósiles.
- Disminución de las emisiones atmosféricas.
- No se generarían desechos extra que necesiten un tratamiento subsecuente.
- Reduce el derramamiento de desechos producidos por otras instalaciones industriales y reduce el efecto vinculado a su acumulación en vertederos.
- Se aseguraría el correcto manejo ambiental de los desechos, sin provocar efectos adicionales en el medio ambiente.

Por lo tanto, nos referimos a un concepto multidisciplinar y complejo donde participan diferentes campos: cambio climático, administración de desechos, calidad del aire, salvaguarda de la salud, conservación de recursos, política energética, entre otros (Marenco et al., 2023, p.2).

La recuperación de energía, al igual que el reciclaje de materiales, está íntimamente vinculada a la prevención y reducción de desechos. Es uno de los dos principales métodos para valorar los desechos generados y, en consecuencia, disminuir sus efectos tanto ambientales como económicos. En conjunto, el reciclaje de materiales y la recuperación de energía proporcionan métodos alternativos y complementarios para aprovechar al máximo los recursos naturales y sus residuos, disminuyendo de esta manera el uso de recursos libres de costo (Shulma, 2019, p.489).

3.3.1. Coincineración

La coincineración (sustitución de combustibles fósiles por residuos) de los residuos a su estado inicial genera más problemas, particularmente cuando poseen alta humedad y elementos orgánicos que se degradan rápidamente y constituyen una amenaza, por ejemplo, epidemiológica. Además, existen difi-

cultades con el traslado y almacenaje de grandes cantidades de estas sustancias, frecuentemente no uniformes (Pronobus, 2020, p.177).

Pero, los incineradores actuales aseguran niveles de emisión seguros para el entorno; estudios recientes indican la oportunidad de un incremento considerable en la rentabilidad de la remoción de PCDD/PCDF en los gases de combustión derivados de la cocombustión a través de la aplicación de aditivos económicos para el componente (Twardowska et al., 2004, p.239).

La co-incineración en hornos de cemento es el más seguro; usualmente se necesita un procedimiento de secado total aguas arriba, dado que los elevados niveles de agua pueden causar dificultades en la combustión del clínker (Schnell, Horst y Quicker, 2020, p.1).

3.3.2. Recuperación de aceites

El procedimiento de tratamiento inicial de los aceites vegetales utilizados conlleva la recuperación de estos, mediante su recolección en los lugares donde se producen y luego su traslado a los centros de tratamiento (Cárdenas et al., 2021, p.4).

Esta recuperación permite que:

- El 60% de los aceites derivados del proceso de reciclaje se emplean en la elaboración de alimentos para animales. Esta cifra resalta la relevancia del aceite de cocina usado (UCO) en el proceso de reciclaje, el cual puede ser valorado para múltiples usos, incluyendo la elaboración de alimentos para animales (Orjuela y Clark, 2020, p.3).
- El 40% residual de los aceites se emplea en varias actividades industriales, entre ellas la fabricación de biocombustibles, tensioactivos y pinturas. Esto señala que los aceites de baja calidad recuperados se están reutilizando en técnicas sustentables con el fin de optimizar el procesamiento de la biomasa y disminuir el impacto en el medio ambiente (Abolore et al., 2024, p.2).

El proceso de tratamiento, básicamente, consiste en:

Decantación y filtración: La decantación y filtrado de aceites de cocina conllevan diversos procedimientos para purificar los aceites de cocina utilizados (UCO):

- **Preservación:** Los aceites culinarios utilizados tienen como objetivo eliminar las impurezas y potenciar su valor. Esto abarca procedimientos como la extracción mediante disolventes para disminuir la acidez y los compuestos polares (Cárdenas et al., 2021, p.2).

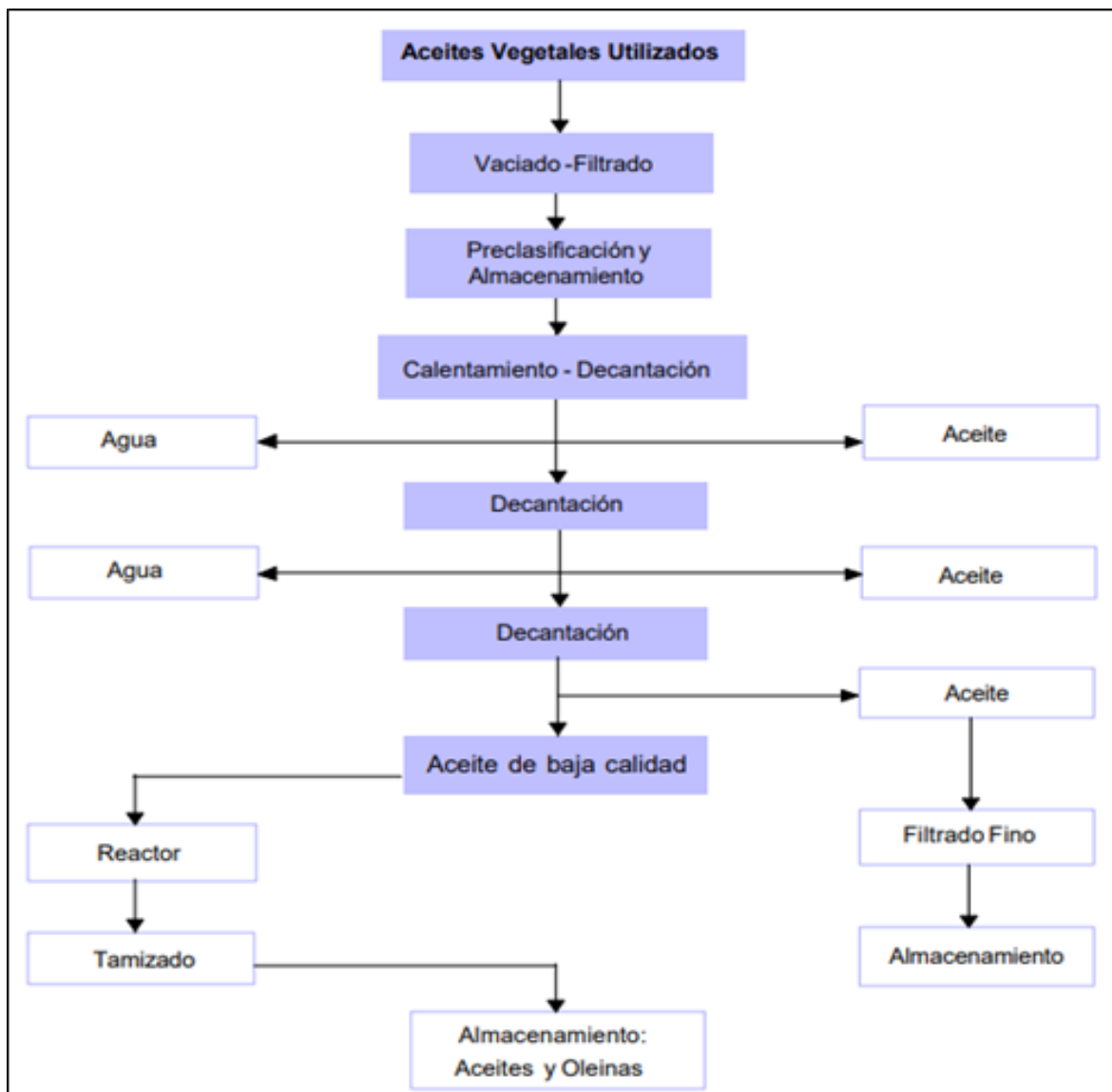
- **Filtración:** El procedimiento de filtrado del aceite de cocina comprende diversas fases, que abarcan el desgomado, neutralización, blanqueo, preparación para la estación invernal y desodorización. El proceso de filtrado es esencial para el blanqueo de aceites comestibles, y la técnica se determina por el tipo de aceite, la temperatura de blanqueo, la cantidad de impurezas, el tipo de tierra blanqueadora y los equipos auxiliares de filtrado. En la preparación para la estación invernal, se lleva a cabo la filtración a temperaturas reducidas, lo que influye en la duración del ciclo de filtrado según la presencia de ceras y triacilglicérols con puntos de fusión más reducidos (Romanic y Luzaic, 2025, p.355).

Composición química: Se examina el carácter químico de los UCO para determinar los métodos de separación apropiados para las impurezas, poniendo especial atención en características como la acidez y la disminución de humedad (Cárdenas et al., 2021, p.1).

Purificación: La finalidad de la purificación (también denominada refinación) consiste en liberar, tanto como sea posible, los triacilglicérols de los diferentes componentes menores de las grasas y aceites, los cuales proporcionan color, sabor y aroma. Para lograrlo, se utilizan varias tecnologías para convertir los UCO en sustancias oleoquímicas, asegurando así que el aceite sea apto para su procesamiento futuro (Cárdenas et al., 2021, p.125).

El diagrama del proceso se detalla a continuación.

Figura 21. *Diagrama del tratamiento previo de aceites vegetales usados*



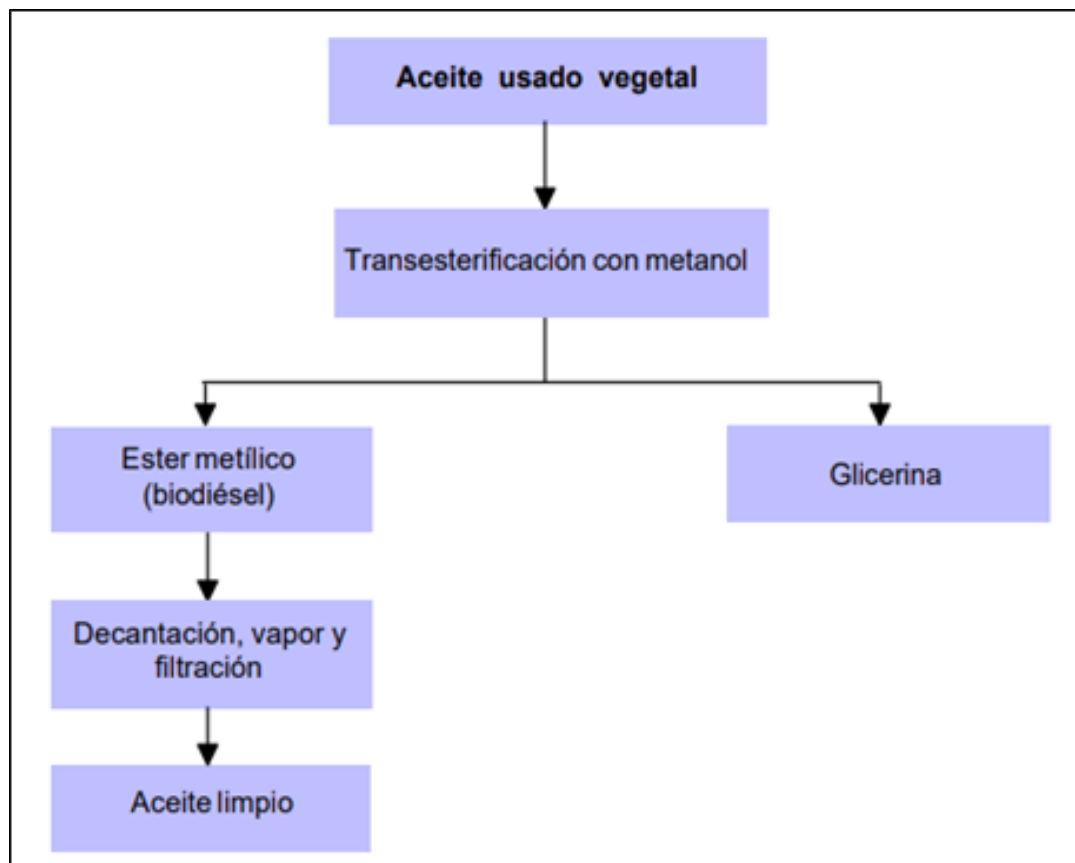
Nota. CAR/PL, 2001, p. 63.

Las oportunidades de uso de los aceites de origen vegetal reciclados se centran en la producción de productos empleados en el sector industrial, con el objetivo de reducir el costo de alguno de los recursos naturales que poseemos (CAR/PL, 2001, p. 64)

Se están desarrollando las posibilidades de utilizar aceites usados, grasas y aceites de cocina en la producción de biodiésel, llevando a cabo varias pruebas piloto en distintos países (Veljkovic et al., 2021, p.147).

El procedimiento para tratar los aceites vegetales destinados a ser utilizados como biodiésel se fundamenta en una serie de reacciones químicas que se describen a continuación (CAR/PL, 2001, p. 65):

Figura 22. Esquema general para la obtención de biodiesel



Nota. CAR/PL, 2001, p. 66

La transesterificación es el procedimiento químico necesario para utilizar los aceites vegetales como biodiésel, que implica la transformación, a través de un catalizador (metanol), del aceite o grasa, liberándose los ésteres metílicos de los ácidos grasos y la glicerina (Medina et al., 2015, p.25).

Clarimón et al. (2005, p.8) detalla la siguiente reacción química elemental:

Triglicérido + 3 metanol = 3 éster metílico de ácido graso + glicerina

La reacción que tiene lugar se puede dividir en las siguientes fases:

- Los triglicéridos que constituyen los ácidos esenciales de los aceites se convierten en ésteres metílicos (biodiésel), resultando en una combinación de glicéridos como subproductos.
- Una vez separados el biodiésel y el glicérido, a través de decantación, se extrae del último el metanol residual a través de un tratamiento con vapor.

- El paso final implica la separación de un desecho insoluble de biodiésel a través de filtración, con el fin de obtener un producto limpio y uniforme (CAR/PL, 2001, p. 66).

3.3.3. Coprocesamiento

Empleo de desechos apropiados en los procesos productivos con el objetivo de recuperar energía y recursos, y, por ende, disminuir el consumo de combustibles y materias primas tradicionales a través de su reemplazo (Decreto Legislativo N° 1278, 2016).

El MINAM, con el apoyo de los sectores relacionados, determina los desechos que pueden ser coprocesados, basándose en las propiedades de los residuos y los efectos ambientales, económicos y sociales que provoca su gestión incorrecta (Decreto Legislativo N° 1278, 2016).

No constituyen residuos coprocesables en hornos de cemento, de acuerdo al Convenio de Basilea, los siguientes:

- Desechos radiactivos o nucleares
- Desechos eléctricos y electrónicos
- Baterías enteras
- Desechos corrosivos, incluidos los ácidos minerales
- Explosivos
- Desechos que contengan cianuro
- Desechos que contengan amianto
- Desechos médicos infecciosos
- Armas químicas o biológicas destinadas a su destrucción
- Desechos que contengan mercurio o estén contaminados con él
- Desechos de composición desconocida o impredecible, incluyendo los desechos municipales sin clasificar

El MINAM, con el apoyo de los sectores implicados, tiene la posibilidad de incorporar otros tipos de desechos sólidos, basándose en sus características y los efectos ambientales, económicos y sociales provocados por su gestión

incorrecta, además de elaborar las normas técnicas pertinentes para establecer los procedimientos necesarios para el coprocesamiento (Decreto Supremo N° 014 – 2017 – MINAM, 2017).

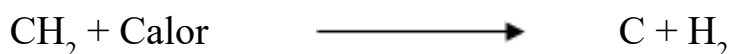
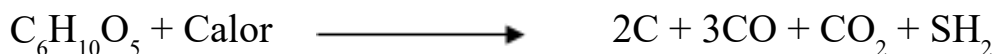
3.3.4. Pirólisis

La pirólisis es un proceso de degradación térmica de los desechos sin presencia de oxígeno, con el objetivo de generar gases inflamables, aceite y carbón. La pirólisis, como tecnología para transformar desechos en energía, ha sido experimentada previamente (Gunasee et al., 2016, p.50).

La pirólisis es la alternativa preferida para la valorización de desechos, dado que ofrece una economía superior (menor amortización de la inversión) y un impacto ambiental reducido (disminución de la liberación de gases de efecto invernadero) (Ayub et al., 2024, p.408). Para la recuperación de energía es una de las técnicas más habituales. El método de combustión más habitual es la generación de energía térmica, tales como la incineración directa y la quema de combustible procedente de residuos (CDR), con el objetivo de producir calor y recuperar energía. El CDR es un combustible sólido con una potencia calorífica superior, una combustión más constante y una densidad energética superior a la incineración directa, que se lleva a cabo a través de la trituración, secado, medicación y moldeado por compresión de los componentes combustibles individualmente (Tao et al., 2023, p.239).

Como indican Muruais & Maíllo (2010), la pirólisis implica un calentamiento indirecto, en su mayoría, del material, en caso de no tener presencia de oxígeno. Este proceso de calor provoca la desintegración de las moléculas orgánicas complejas del desecho, seguida de una condensación. Por consiguiente, se generan tres productos: gases combustibles, líquido combustible y sólido combustible, con los inertes que se incorporan al desecho y no han sido modificados.

Las reacciones habituales a la pirólisis incluyen:



El gas inflamable, también conocido como syngás, es una combinación de distintos gases con una capacidad calorífica fluctuante (10.000 a 20.000 kJ/Nm³).

La parte líquida (líquidos pirolíticos) se compone de diversos hidrocarburos, agua y catramio (p. 56).

Los desechos sólidos derivados de la pirólisis pueden poseer carbono en un porcentaje que supera el 40%, representando una proporción considerable de energía del desecho inicial.

Por lo tanto, la recuperación de energía del horno es crucial para la eficiencia en el uso de energía. Esta puede realizarse de diversas formas.

- Gases y aceites obtenidos se producen a través de un ciclo de vapor para generar energía eléctrica.
- Implementación como fase inicial de un procedimiento de gasificación.
- Utilización del producto sólido como combustible en espacios industriales, como en plantas de cementación, por ejemplo.

Los hornos usados, típicamente, en pirólisis son:

- Hornos rotativos.
- Hornos de tubos calentados externamente (“heated tubes”).

Considerando los procedimientos implementados en las plantas con esta tecnología, se propone la pirólisis como una fase anterior a la combustión para optimizar su eficiencia energética. Además, de los desechos obtenidos, es necesario escoger los materiales con mayor contenido energético y aplicar un pretratamiento para adaptarlos a las particularidades del proceso (Grau & Farré, 2011, p. 26).

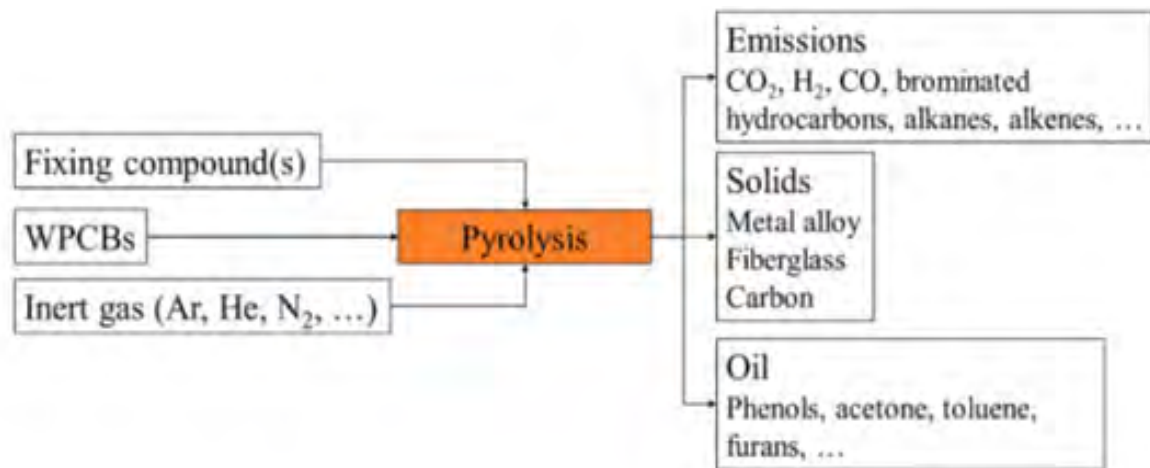
Residuos más apropiados

Para tratar los desechos a través de pirólisis, es necesario satisfacer una serie de condiciones. No obstante, resulta complicado determinar la categoría de desechos clasificados como apropiados o inapropiados, ya que está fuertemente vinculado con el tipo de reactor empleado y las condiciones de funcionamiento. En esencia, se ven como desechos más adecuados:

- **Recursos de placas de circuito impreso (WPCB):** La pirólisis resulta efectiva para la recuperación de cerámicas y elementos metálicos (Faraji et al., 2022, p.2).

La Figura 23 ilustra un proceso habitual de pirólisis para el manejo de desechos electrónicos:

Figura 23. *Pirólisis para el tratamiento de residuos electrónicos*



Nota. Faraji et al., 2022, p.2

- **Residuos sólidos de la ciudad (RSU):** Estos desechos tienen la capacidad de transformarse en biocombustible, y la pirólisis genera aproximadamente un 43% de bioaceite, un 27% de biocarbón y un 25% de gas de síntesis (Hasan et al., 2021, p.4).

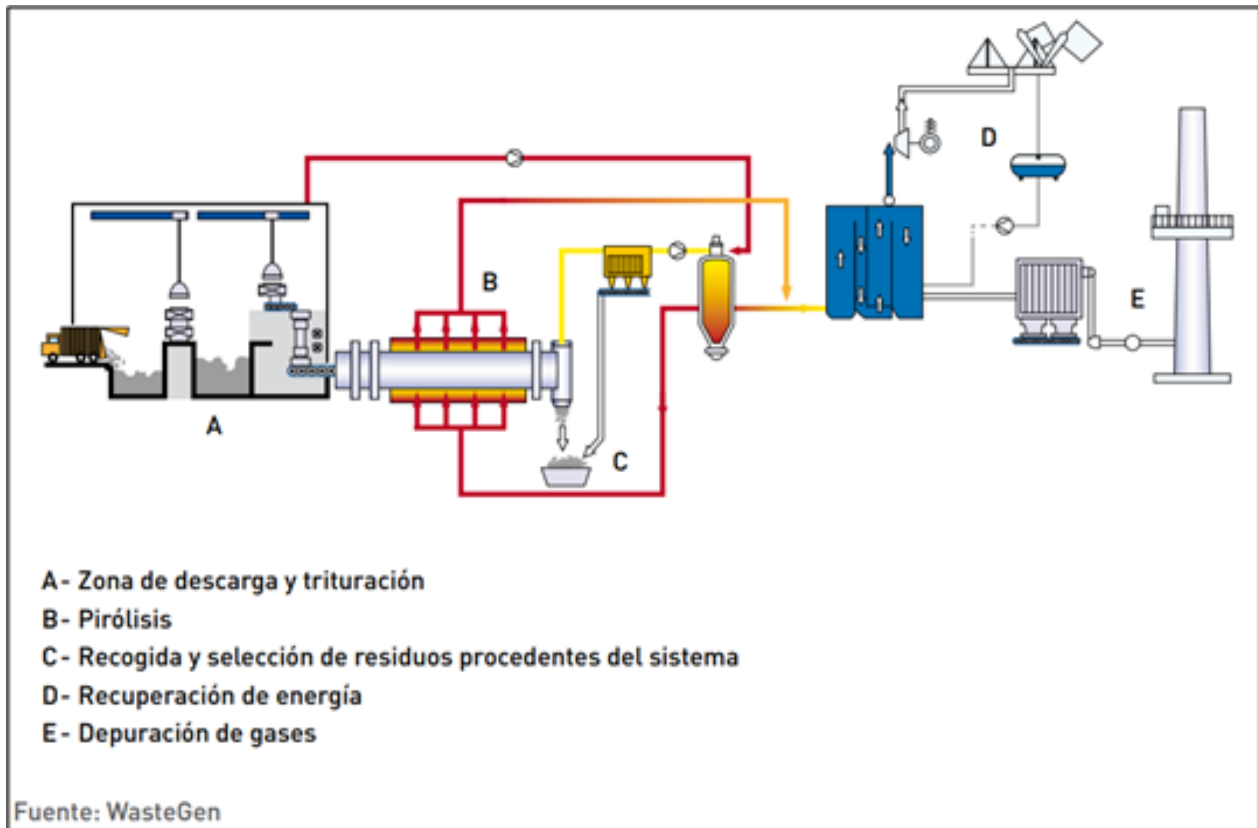
- **Recursos alimentarios:** La copirólisis con corteza de madera tiene la capacidad de incrementar la producción de hidrógeno, lo que la hace una alternativa factible (Hasan et al., 2021, p.4).

En cualquier situación, respecto a la clasificación y al pretratamiento, se aplican, en mayor o menor grado, los mismos criterios que para el proceso de gasificación:

- 1) Los desechos deben provenir de un sistema de recolección selectiva y/o, en caso contrario, deben ser clasificados antes de llegar a la planta de pirólisis.
- 2) Los desechos pesados, metales, materiales de construcción, residuos peligrosos, vidrio y ciertos plásticos, como el PVC, no son permitidos.

3) Es necesario triturar, secar y homogeneizar los desechos, con los límites de uso diferentes para cada clase de procedimiento (Grau & Farré, 2011, p. 27).

Figura 24. *Diagrama de proceso planta de pirólisis*



Nota. Grau & Farré, 2011, p. 25

3.3.5. Biodiésel

Desde un punto de vista general, el biodiésel se refiere a un combustible renovable, originado de lípidos naturales como aceites de origen vegetal o animal, adquirido mediante un procedimiento industrial relativamente sencillo de transesterificación del aceite de origen vegetal o animal. Tras el proceso y en contraposición al aceite que lo originó, el biodiésel (éster metílico) posee una viscosidad parecida a la del diésel procedente del petróleo y puede sustituirlo en las aplicaciones más habituales (CEPAL, 2007, p. 7 citado en Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2010).

Figura 25. *Proceso de transesterificación del aceite*

Insumos		Productos
(87%) Aceite + (12%) Metanol + (1%) Catalizador	→	(86%) Biodiésel + (9%) Glicerina + Etanol (4%) + (1%) Fertilizante

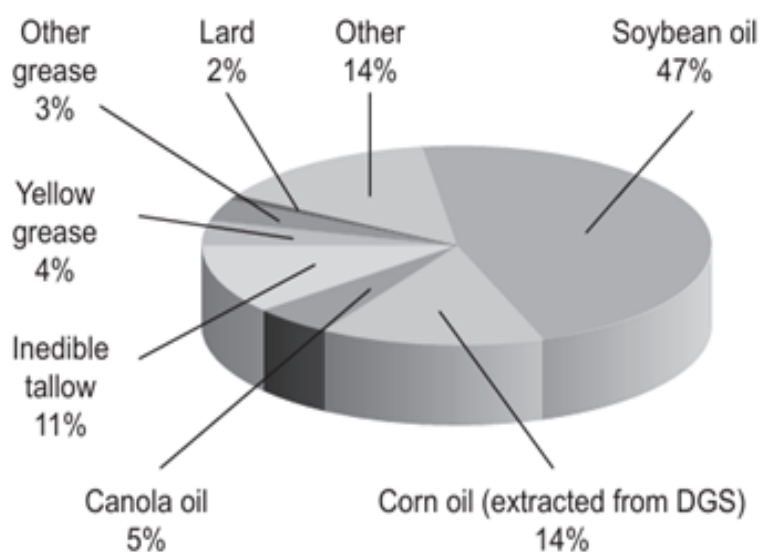
Nota. IICA, 2010, p. 7.

Para una conceptualización técnica del biodiésel y su combinación, se puede adoptar la definición empleada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, en inglés). Según esta institución:

Biodiésel, n. Para una conceptualización técnica del biodiésel y su combinación, se puede adoptar la definición empleada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, en inglés). Según esta institución (Hedden, 2020, p.224). Las materias primas de las cuales se compone se encuentran en la figura 26.

Figura 26. *Materias primas de biodiésel*

Biodiesel feedstocks
in marketing:
2012–2013

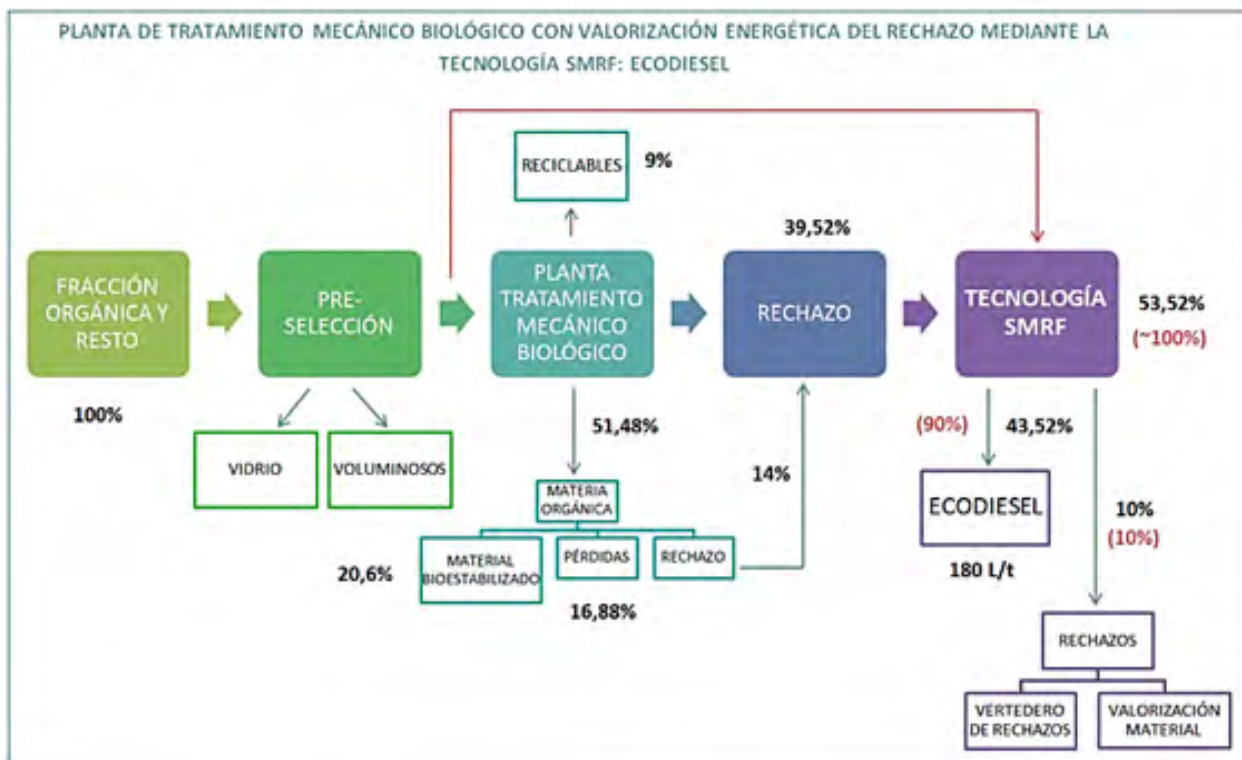


Nota. Hedden, 2020, p.224

Biodiésel mezcla, n. Las mezclas de biodiésel son compatibles con los motores de encendido por compresión (diésel) sin realizar grandes alteraciones. Se conoce como BXX a una combinación de biodiésel y gasóleo derivado del petróleo, donde XX representa el porcentaje en volumen de biodiésel (esto es, B5 1/4 5% de biodiésel combinado con un 95% de gasóleo derivado del petróleo; B20 1/4 20% de biodiésel combinado con un 80% de gasóleo derivado del petróleo, etc.) (More, 2020, p.45).

A pesar de que se puede elaborar biodiésel de cualquier aceite, las fuentes que se han empleado hasta ahora son limitadas. El aceite de colza y, en menor medida, el aceite de palma aceitera son los principales productores de la Unión Europea (UE), en cambio, el aceite de soja es el principal productor de los Estados Unidos. Desde una perspectiva potencial, se podría afirmar que, en los países de climas templados, la materia prima para la elaboración de biodiésel se deriva del aceite de colza y soja, mientras que, en los países subtropicales y tropicales, se extrae del aceite de la palma africana y otras especies oleaginosas (IICA, 2010, p. 8).

Figura 27. Valorización energética mediante la tecnología SMRF para la obtención de ECODIESEL



Nota. Fernández – González, 2014

CONCLUSIONES

Se han introducido las definiciones y categorías de residuos sólidos a lo largo de este libro, además de los procedimientos para valorizar residuos sólidos tanto municipales como no municipales. Este análisis genera conclusiones que tienen como objetivo guiar el debate sobre la valorización y gestión de residuos.

- Un método esencial para una gestión sostenible de residuos es la valorización de los mismos: Es esencial la valorización de residuos, ya sea energética o material, para disminuir el número de desechos que se arrojan a los vertederos y fomentar la sostenibilidad.
- Una alternativa factible para el manejo de desechos es la valorización material: La valorización de materiales implica la recolección de materiales útiles a partir de los desechos, lo cual puede lograrse mediante procesos como el reciclaje y la reutilización.
- La gestión de residuos puede ser realizada de manera viable mediante la valorización energética: La generación de energía a partir de desechos es lo que se entiende por valorización energética, y puede llevarse a cabo mediante procesos como la coproducción, la pirólisis, la recuperación de aceites, la coincineración y la elaboración de biodiésel.
- Es necesario reducir al mínimo la administración de residuos en vertederos: Es preciso reducir al mínimo la administración de residuos en vertederos, dado que puede tener efectos perjudiciales sobre el medio ambiente y la salud de las personas.
- La valorización de residuos no municipales representa una oportunidad para la sustentabilidad. La valorización de residuos no municipales puede representar una ocasión para la sostenibilidad, pues tiene el potencial de producir beneficios tanto a nivel económico como ambiental.

En síntesis, la valorización de residuos es una estrategia fundamental para gestionar los desechos de manera sostenible y puede ser energética o material. La gestión de residuos en los vertederos debe reducirse, y la valorización energética y material son alternativas factibles. Valorar los residuos no municipales es una oportunidad para la sostenibilidad y puede producir beneficios tanto económicos como medioambientales.

EPILOGO

Es un reto complicado el manejo de residuos, que demanda una perspectiva integral y sostenible. Este libro ha investigado las oportunidades y los retos relacionados con la valorización de residuos, al tiempo que se propone un enfoque que intenta equilibrar la eficacia económica, la sostenibilidad medioambiental y la responsabilidad social.

La valorización de residuos es un proceso que necesita la cooperación de todos los participantes, desde quienes generan los desechos hasta los gestores y las personas encargadas de políticas públicas. Es esencial fomentar la conciencia y el aprendizaje acerca de lo relevante que son el manejo y la valorización de los residuos.

En esta dirección, el libro “Residuos con Valor” tiene como objetivo contribuir al debate acerca de la gestión y valorización de residuos. No se propone ser una receta finalizada o una fórmula universal, sino más bien un marco de referencia que conecte la teoría y la práctica en lo que respecta a la valorización de residuos.

Hallando un balance entre la responsabilidad social, la sostenibilidad medioambiental y la eficiencia económica, se logra una gestión de residuos sustentable. Esto necesita una perspectiva holística y una cooperación eficaz entre todos los participantes.

Finalmente, el proceso de valorización de residuos necesita la creatividad y la imaginación de cada uno de los participantes. Es crucial fomentar la innovación y la experimentación en el manejo de residuos, así como encontrar soluciones que sean responsables y sostenibles para los retos vinculados a su gestión.

Que estos sitios web inciten a los lectores a considerar la relevancia de valorar los residuos y a encabezar el cambio hacia una sociedad más responsable y sustentable. La gestión de residuos es un reto que necesita de la cooperación y el compromiso de todos, y es esencial encontrar soluciones sostenibles e innovadoras para enfrentar este reto.

GLOSARIO

- Utilización de desechos: Proceso de recolección y uso de desechos para obtener beneficios en términos económicos, ambientales y sociales.
- Biodiésel: Combustible renovable que se genera a partir de aceites vegetales o grasas animales, el cual puede emplearse como sustituto de los combustibles fósiles.
- Coprocesamiento: Proceso de valorización energética que supone la combustión de desechos en hornos cementeros con el objetivo de producir energía y disminuir el volumen de residuos que se envían a los vertederos.
- Manejo de residuos: Conjunto de tácticas y procedimientos para gestionar los desechos de forma segura y sostenible, entre las que se incluyen la disminución, reutilización y reciclaje de materiales.
- Pirólisis: Proceso de valorización energética que consiste en la descomposición térmica de materiales orgánicos sin oxígeno, con el objetivo de crear productos químicos y combustibles.
- Reciclaje: Proceso de valorización material que supone convertir materiales desechados en productos nuevos, lo que disminuye la necesidad de recursos naturales y la producción de residuos.
- Recolección de aceites: Proceso de valorización energética que consiste en recuperar aceites de los desechos para que puedan ser empleados como materias primas o combustibles.
- Desechos sólidos: Materiales y sustancias que se consideran innecesarios o que son desechados, los cuales pueden tener efectos perjudiciales en la salud de las personas y el medio ambiente si no se gestionan correctamente.
- Desechos sólidos de los municipios: Residuos producidos en zonas urbanas y rurales que son responsabilidad de las autoridades municipales o locales.

- Residuos sólidos no urbanos: Desechos producidos en actividades de servicios, comerciales e industriales que no son responsabilidad de las autoridades locales o de los municipios.
- Reaprovechamiento: Método de valorización material que conlleva la utilización reiterada de productos o materiales sin alterar su forma o estructura original.
- Valoración de desechos: Proceso de recolección y uso de desechos con el fin de producir beneficios económicos, sociales y medioambientales.
- Valoración a nivel energético: El proceso de producción de energía a partir de los desechos, que puede llevarse a cabo por medio de una variedad de tecnologías y procedimientos.
- Valorización de materiales: Proceso de recuperación de materiales útiles contenidos en los desechos, el cual puede llevarse a cabo mediante acciones como la reutilización y el reciclaje.

REFERENCIAS

- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian journal of petroleum*, 27(4), 1275-1290. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>
- Abolore, R. S., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2024). Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 7, 100396. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100396>
- Adetunji, A. I., Oberholster, P. J., & Erasmus, M. (2023). From garbage to treasure: A review on biorefinery of organic solid wastes into valuable biobased products. *Bioresource Technology Reports*, 24, 101610. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101610>
- Agu, C. E., Pfeifer, C., Eikeland, M., Tokheim, L. A., & Moldestad, B. M. (2019). Measurement and characterization of biomass mean residence time in an air-blown bubbling fluidized bed gasification reactor. *Fuel*, 253, 1414-1423. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.103>
- Amalina, F., Abd Razak, A. S., Krishnan, S., Sulaiman, H., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications—A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100134>
- Amin, N., Aslam, M., Yasin, M., Hossain, S., Shahid, M. K., Inayat, A., ... & Ghauri, M. (2023). Municipal solid waste treatment for bioenergy and resource production: potential technologies, techno-economic-environmental aspects and implications of membrane-based recovery. *Chemosphere*, 323, 138196. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138196>
- Apollon, W., Rusyn, I., Paucar, N. E., Hibbert, M., Kamaraj, S. K., & Sato, C. (2025). Energy recovery from organic wastes using microbial fuel cells: Traditional and nonconventional organic substrates. *Resources*, 14(3), 47. <https://doi.org/10.3390/resources14030047>
- Arce-Bastias, F. (2022). Beneficios ambientales del reciclaje de residuos plásticos posconsumo para la producción de postes en Mendoza, Argentina. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 25(SPE). <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.nsupl.1.2022.2145>

Ashworth, D. C., Elliott, P., & Toledano, M. B. (2014). Waste incineration and adverse birth and neonatal outcomes: a systematic review. *Environment international*, 69, 120-132.

Atimtay, A., & Yurdakul, S. (2020). Combustion and Co-Combustion characteristics of torrefied poultry litter with lignite. *Renewable Energy*, 148, 1292-1301. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.003>

Ayub, Y., Moktadir, M. A., & Ren, J. (2024). Sustainable waste valorization process selection through AHP and advanced Interval Valued Fermatean Fuzzy with integrated CODAS. *Process Safety and Environmental Protection*, 185, 408-422. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.03.019>

Benis, K. Z., Damuchali, A. M., Soltan, J., & McPhedran, K. N. (2020). Treatment of aqueous arsenic—A review of biochar modification methods. *Science of The Total Environment*, 739, 139750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139750>

Braga Nan, L., Trably, E., Santa-Catalina, G., Bernet, N., Delgenès, J. P., & Escudié, R. (2020). Biomethanation processes: new insights on the effect of a high H₂ partial pressure on microbial communities. *Biotechnology for biofuels*, 13, 1-17. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01776-y>

Cárdenas, J., Orjuela, A., Sánchez, D. L., Narváez, P. C., Katryniok, B., & Clark, J. (2021). Pre-treatment of used cooking oils for the production of green chemicals: A review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125129>

Cedano de León, D. C. (2013). Valorización energética de residuos como combustibles alternativos en plantas cementeras.

Centeno, L. (2010). *Capítulo 2. Aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos*. Guía de valoración energética de residuos. (p. 29 – 30, 32 – 34). Madrid, España.

Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). (2001). Posibilidades de reciclaje y aprovechamiento de los aceites usados. (p. 62 – 67). España.

Chan, W. P., Veksha, A., Lei, J., Oh, W. D., Dou, X., Giannis, A., ... & Lim, T. T. (2019). A hot syngas purification system integrated with downdraft gasification of municipal solid waste. *Applied Energy*, 237, 227-240. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.031>

- Cho, H. H., Strezov, V., & Evans, T. J. (2024). Environmental impact assessment of hydrogen production technologies. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies: Sustainable Energy Technologies & Sustainable Digital Technologies* (pp. 302-312). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00077-2>
- Chen, W. H., Lin, B. J., Lin, Y. Y., Chu, Y. S., Ubando, A. T., Show, P. L., ... & Pétrissans, M. (2021). Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 82, 100887. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887>
- Chen, B., Liu, M., Wang, Q., Wang, L., Guo, Q., & Zhou, S. (2025). Analysis of industrial solid waste and the possibility of recycling and utilization. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 18(1), 2493155. <https://doi.org/10.1080/17518253.2025.2493155>
- Chidepatil, A., Bindra, P., Kulkarni, D., Qazi, M., Kshirsagar, M., & Sankaran, K. (2020). From trash to cash: how blockchain and multi-sensor-driven artificial intelligence can transform circular economy of plastic waste?. *Administrative Sciences*, 10(2), 23. <https://doi.org/10.3390/admsci10020023>
- Clarimón, L., Fernández, C., & Sánchez, B. (2005). *Informe sobre el empleo de combustibles renovables. Biodiésel. Informe sobre el empleo de combustibles renovables. Biodiésel [cited; 1-28]*.
- Daful, A. G., & Chandraratne, M. R. (2020). Biochar production from biomass waste-derived material. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11249-4>
- Dar, R. A., Parmar, M., Dar, E. A., Sani, R. K., & Phutela, U. G. (2021). Bio-methanation of agricultural residues: Potential, limitations and possible solutions. *Renewable and sustainable energy reviews*, 135, 110217. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110217>
- Das, S. K., Ghosh, G. K., & Avasthe, R. (2021). Applications of biomass derived biochar in modern science and technology. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101306. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101306>
- De Boni, A., Melucci, F. M., Acciani, C., & Roma, R. (2022). Community composting: A multidisciplinary evaluation of an inclusive, participative, and eco-friendly approach to biowaste management. *Cleaner Environmental Systems*, 6, 100092. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100092>

- Deepthi, M. P., Kathireswari, P., Rini, J., Saminathan, K., & Karmegam, N. (2021). Vermitranformation of monogastric *Elephas maximus* and ruminant *Bos taurus* excrements into vermicompost using *Eudrilus eugeniae*. *Bioresource Technology*, 320, 124302. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124302>
- Decreto Legislativo N° 1278. Diario El Peruano, Lima, Perú, 23 de diciembre de 2016.
- Decreto Supremo N° 014 – 2017 – MINAM. Diario El Peruano, Lima, Perú, 21 de diciembre de 2017.
- Demets, R., Van Kets, K., Huysveld, S., Dewulf, J., De Meester, S., & Ragaert, K. (2021). Addressing the complex challenge of understanding and quantifying substitutability for recycled plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105826. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105826>
- Duan, Z., Scheutz, C., & Kjeldsen, P. (2021). Trace gas emissions from municipal solid waste landfills: A review. *Waste Management*, 119, 39-62. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.015>
- El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., ... & Ok, Y. S. (2019). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536-554. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>
- Enebe, M. C., & Erasmus, M. (2023). Vermicomposting technology-A perspective on vermicompost production technologies, limitations and prospects. *Journal of Environmental Management*, 345, 118585. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118585>
- Erdoğan, S. (2025). Landfill gas to energy beyond an age of waste: A review of research trends. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 101019. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2025.101019>
- Faraji, F., Golmohammadzadeh, R., & Pickles, C. A. (2022). Potential and current practices of recycling waste printed circuit boards: a review of the recent progress in pyrometallurgy. *Journal of environmental management*, 316, 115242. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115242>
- Fernández – González, J. (Noviembre de 2014). *Valorización energética de Residuos Sólidos Urbanos*. Conference: I Jornadas de Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos: Problemas y perspectivas en su gestión, tratamiento y valorización. <https://www.researchgate.net/publication/268220362>

FICHTNER - LKSUR. (2004). *Tomo IV: Residuos Sólidos Industriales. Programa de saneamiento de Montevideo y área metropolitana*. Plan director de residuos sólidos de Montevideo y área metropolitana. p. 111, 118 – 120, 126 – 127.

Gaurav, G. K., Mehmood, T., Cheng, L., Klemeš, J. J., & Shrivastava, D. K. (2020). Water hyacinth as a biomass: A review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 122214. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122214>

Ge, L., Zhao, C., Wang, Z., Zuo, M., Yao, L., Wu, K., ... & Xu, C. (2025). A new method for the preparation of biomass-based solid fuels: Pyrolysis-impregnation-cobaking. *Energy*, 321, 135522. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135522>

Ge, S., Yek, P. N. Y., Cheng, Y. W., Xia, C., Mahari, W. A. W., Liew, R. K., ... & Lam, S. S. (2021). Progress in microwave pyrolysis conversion of agricultural waste to value-added biofuels: a batch to continuous approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110148. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110148>

Grau, A. & Farré, O. (2011). *Tecnología*. Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011 – 2020. (pp. 21, 23 – 29). Madrid, España.

Hedden, Robert G. (2020). Chapter 12 - Bioheat. *Bioenergy* (Second Edition). 223-244. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815497-7.00012-9>

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura – IICA. (2010). Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las américas: II Biodiésel / IICA, programa Hemisférico en Agroenergía y Biocombustibles – San José, C.R.: IICA. 7 – 9 pp.

Gunasee, S. D., Carrier, M., Gorgens, J. F., & Mohee, R. (2016). Pyrolysis and combustion of municipal solid wastes: Evaluation of synergistic effects using TGA-MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 121, 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.07.001>

Hanc, A., Hrebeckova, T., Pliva, P., & Cajthaml, T. (2020). Vermicomposting of sludge from a malt house. *Waste Management*, 118, 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.027>

- 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, 111073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111073>
- Hidalgo, A. (2012). Valorización de residuos de biomasa en la industria de la construcción. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/46860/1/Valorizacion%-2520de%-2520residuos%-2520de%-2520biomasa%-2520en%-2520la%-2520industria.pdf>
- Holber, W. M. (2000). Ionization by microwave electron cyclotron resonance plasma. In *Thin Films* (Vol. 27, pp. 67-94). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1079-4050\(00\)80006-X](https://doi.org/10.1016/S1079-4050(00)80006-X)
- Hussain, C. M., Paulraj, M. S., & Nuzhat, S. (2022). Chapter 2-Source reduction, waste minimization, and cleaner technologies. *Source reduction and waste minimization*, 23-59. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824320-6.00002-2>
- Imran, S., Hussain, M., Akhter, P., Jamil, F., Musaddiq, S., Allahyari, S., & Park, Y. K. (2025). Municipal solid waste valorization to biofuel production: Comparative evaluation, policies, challenges, and practices. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 106099. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.106099>
- Iqbal, A., Liu, X., & Chen, G. H. (2020). Municipal solid waste: Review of best practices in application of life cycle assessment and sustainable management techniques. *Science of The Total Environment*, 729, 138622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138622>
- Irena Twardowska, Karl-Werner Schramm, Karla Berg. (2004). III.4 - Sewage sludge. Waste Management Series. 239-295. [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(04\)80013-8](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(04)80013-8)
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., & Tam, V. W. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of cleaner production*, 263, 121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>
- Kafle, S., Karki, B. K., Sakhakarmy, M., & Adhikari, S. (2025). A Review of Global Municipal Solid Waste Management and Valorization Pathways. *Recycling*, 10(3), 113. <https://doi.org/10.3390/recycling10030113>

- Kale, C., & Gökçek, M. (2020). A techno-economic assessment of landfill gas emissions and energy recovery potential of different landfill areas in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122946. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122946>
- Kan, T., Strezov, V., Evans, T., He, J., Kumar, R., & Lu, Q. (2020). Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass: A review of variations in process factors and system structure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110305>
- Karpan, B., Raman, A. A. A., & Aroua, M. K. T. (2021). Waste-to-energy: Coal-like refuse derived fuel from hazardous waste and biomass mixture. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 655-664. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.009>
- 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 Publications. https://books.google.com.pe/books?id=bnN_DwAAQBAJ&lpg=P-P13&ots=faR7Atb-Jc&lr&hl=es&pg=PP13#v=onepage&q&f=false
- Krishnan, S., Zulkapli, N. S., Kamyab, H., Taib, S. M., Din, M. F. B. M., Abd Majid, Z., ... & Othman, N. (2021). Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101525. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101525>
- Kristanto, G. A., & Koven, W. (2019). Estimating greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Depok, Indonesia. *City and environment interactions*, 4, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100027>
- Krysanova, K., Krylova, A., Kulikova, M., Kulikov, A., & Rusakova, O. (2022). Biochar characteristics produced via hydrothermal carbonization and torrefaction of peat and sawdust. *Fuel*, 328, 125220. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125220>
- Kumar, H., & Sharma, A. (2023). Impact of waste treatment through genetic modification and reuse of treated water on human health. In *Antimicrobial Resistance in Wastewater and Human Health* (pp. 153-204). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96124-0.00001-5>
- Kundariya, N., Mohanty, S. S., Varjani, S., Ngo, H. H., Wong, J. W., Taherzadeh, M. J., ... & Bui, X. T. (2021). A review on integrated approaches for municipal solid waste for environmental and economical relevance: Monitoring tools, technologies, and strategic innovations. *Bioresource technology*, 342, 125982. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125982>

- Kurniawan, K., Soefihara, M. D. A., Nababan, D. C., & Kim, S. (2022). Current status of the recycling of e-waste in Indonesia. *Geosystem Engineering*, 25(3-4), 83-94. <https://doi.org/10.1080/12269328.2022.2142856>
- Lee, S., Chang, H., & Lee, J. (2024). Construction and demolition waste management and its impacts on the environment and human health: Moving forward sustainability enhancement. *Sustainable Cities and Society*, 115, 105855. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105855>
- Lin, S. L., Zhang, H., Chen, W. H., Song, M., & Kwon, E. E. (2023). Low-temperature biochar production from torrefaction for wastewater treatment: a review. *Bioresource technology*, 387, 129588. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129588>
- Liu, S., Niu, Y., Wen, L., Kang, Y., Wang, D., & Hui, S. E. (2020). Effects of physical structure of high heating-rate chars on combustion characteristics. *Fuel*, 266, 117059. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117059>
- Lowe, C. N., Butt, K. R., & Sherman, R. L. (2023). Chapter 21–Current and potential benefits of mass earthworm culture. *Mass production of beneficial organisms: invertebrates and entomopathogens*. 2nd ed. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822106-8.00008-7>
- Malladi, R. C., Chandran, G., & Selvaraj, T. (2025). Upcycling of construction and demolition waste: Recovery and reuse of binder and fine aggregate in cement applications to achieve circular economy. *Cleaner Engineering and Technology*, 24, 100864. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100864>
- Medina Villadiego, M., Ospino Roa, Y., & Tejeda Benítez, L. (2015). Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel. *Luna Azul*, (40), 25-34. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.3>
- Mamvura, T. A., & Danha, G. (2020). Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon*, 6(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03531>
- Manyà, J. J., García-Morcate, D., & González, B. (2020). Adsorption performance of physically activated biochars for postcombustion CO₂ capture from dry and humid flue gas. *Applied Sciences*, 10(1), 376. <https://doi.org/10.3390/app10010376>

Marenco-Porto, C. A., Fierro, J. J., Nieto-Londoño, C., Lopera, L., Escudero-Atehortua, A., Giraldo, M., & Jouhara, H. (2023). Potential savings in the cement industry using waste heat recovery technologies. *Energy*, 279, 127810. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127810>

Mayes, W. M., Hull, S. L., & Gomes, H. I. (2022). From linear economy legacies to circular economy resources: maximising the multifaceted values of legacy mineral wastes. In *Circular Economy and Sustainability* (pp. 409-431). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819817-9.00009-0>

Ministerio de Desarrollo Social. (2013). *Metodología de formulación y evaluación socioeconómica de proyectos de valorización de residuos municipales*. Recuperado de https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/8/52958/11_2MedioAmbiente_Valorizacion_de_residuos.pdf

Ministerio del Ambiente. Parte 3: Reciclaje y disposición final segura de Residuos Sólidos. <https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39052>

Mishra, S., & Upadhyay, R. K. (2021). Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters. *Materials Science for Energy Technologies*, 4, 329-340. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.08.009>

Molino, A., Larocca, V., Chianese, S., & Musmarra, D. (2018). Biofuels production by biomass gasification: A review. *Energies*, 11(4), 811. <https://doi.org/10.3390/en11040811>

More show. (2020). Chapter 2 - Introduction to biodiesel and glossary of terms. *Bioenergy* (Second Edition), 45-49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815497-7.00002-6>

Muruais, J. & Maíllo, A. (2010). *Capítulo 3. La incineración de los residuos sólidos urbanos. Aporte energético y ambiental*. Guía de valoración energética de residuos. (p. 55 - 56). Madrid, España.

Mutsengerere, S., Chihobo, C. H., Musademba, D., & Nhapi, I. (2019). A review of operating parameters affecting bio-oil yield in microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 328-336. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.030>

Nandhini, R., Berslin, D., Sivaprakash, B., Rajamohan, N., & Vo, D. V. N. (2022). Thermochemical conversion of municipal solid waste into energy and hydrogen: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(3), 1645-1669. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01410-3>

Negi, T., Kumar, Y., Sirohi, R., Singh, S., Tarafdar, A., Pareek, S., ... & Sagar, N. A. (2022). Advances in bioconversion of spent tea leaves to value-added products. *Bioresource Technology*, 346, 126409. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126409>

NTP 900.58. (2019). Gestión de Residuos. Código de colores para el almacenamiento de residuos sólidos. 2da edición, INACAL. Lima, Perú. p. 5 – 6. <https://servilex.pe/documents/ambiente/rd003-2019-inacal.pdf>

Ong, H. C., Chen, W. H., Singh, Y., Gan, Y. Y., Chen, C. Y., & Show, P. L. (2020). A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach. *Energy Conversion and Management*, 209, 112634. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112634>

Orbegoso, C. & Muller, S. (Junio de 2019). *Perú: La Valorización de Residuos Sólidos de Ámbito Municipal*, Tema de Aprendizaje #3 – Gobernanza Integrada. Parte A: El Mapeo Institucional. Iniciativa Climática Internacional (IKI) “Mobilizing Investment for NDC Implementation”. El Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU) de Alemania; SouthSouthNorth (SSN). 18 pp.

Orjuela, A., & Clark, J. (2020). Green chemicals from used cooking oils: Trends, challenges, and opportunities. *Current opinion in green and sustainable chemistry*, 26, 100369. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100369>

Osorio, I. D. C. A. (2016). Reutilización de Residuos Sólidos en la Promoción de la Cultura Ambiental. *Revista Científica*, 1(1), 212-230. <https://doi.org/10.29394/scientific.issn.2542-2987.2016.1.1.12.212-230>

Pandey, C. V., Gajić, G., Sharma, P., & Roy, M. (2022). *Adaptive phytoremediation practices: Resilience to climate change* (pp. 1-352). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823831-8.00002-5>

Patil, D. S., Kar, R., & Chopade, S. S. (2017). Cold plasma processing of materials for extreme conditions. In *Materials Under Extreme Conditions* (pp. 411-469). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801300-7.00012-7>

Peng, X., Jiang, Y., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2023). Recycling municipal, agricultural and industrial waste into energy, fertilizers, food and construction materials, and economic feasibility: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 765-801. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01551-5>

- Prajapati, P., Varjani, S., Singhanian, R. R., Patel, A. K., Awasthi, M. K., Sindhu, R., ... & Chaturvedi, P. (2021). Critical review on technological advancements for effective waste management of municipal solid waste—Updates and way forward. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101749. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101749>
- Pratap, V., Bombaywala, S., Mandpe, A., & Khan, S. U. (2021). Solid waste treatment: Technological advancements and challenges. In *Soft computing techniques in solid waste and wastewater management* (pp. 215-231). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824463-0.00014-8>
- Pronobis, M. (2020). Adaptation of boilers for biomass burning. 177-211. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819921-3.00007-8>
- Purchase, C. K., Al Zulayq, D. M., O'Brien, B. T., Kowalewski, M. J., Berenjian, A., Tarighaleslami, A. H., & Seifan, M. (2021). Circular economy of construction and demolition waste: A literature review on lessons, challenges, and benefits. *Materials*, 15(1), 76. <https://doi.org/10.3390/ma15010076>
- Raheem, I., Mohiddin, M. N. B., Tan, Y. H., Kansedo, J., Mubarak, N. M., Abdullah, M. O., & Ibrahim, M. L. (2020). A review on influence of reactor technologies and kinetic studies for biodiesel application. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 91, 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.08.024>
- Rajendran, N., Gurunathan, B., Han, J., Krishna, S., Ananth, A., Venugopal, K., & Priyanka, R. S. (2021). Recent advances in valorization of organic municipal waste into energy using biorefinery approach, environment and economic analysis. *Bioresource Technology*, 337, 125498. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125498>
- Ramadan, B. S., Rachman, I., Ikhlas, N., Kurniawan, S. B., Miftahadi, M. F., & Matsumoto, T. (2022). A comprehensive review of domestic-open waste burning: recent trends, methodology comparison, and factors assessment. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(5), 1633-1647. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01430-9>
- Ren, J., Cao, J. P., Zhao, X. Y., Yang, F. L., & Wei, X. Y. (2019). Recent advances in syngas production from biomass catalytic gasification: A critical review on reactors, catalysts, catalytic mechanisms and mathematical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109426. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109426>

- Ren, X., Liu, T., Awasthi, M. K., Varjani, S., Pandey, A., & Zhang, Z. (2021). Municipal solid waste biorefineries: A case study in China. In *Waste biorefinery* (pp. 439-457). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821879-2.00016-8>
- Romanić, R., & Lužaić, T. (2025). Application of filtration in oil refining. In *Mechanical Separation Processes in the Food Industry* (pp. 355-390). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819523-9.00004-4>
- Saha, P., & Handique, S. (2023). A review on municipal solid wastes and their associated problems and solutions (waste-to-energy recovery and nano-treatment) with special reference to India. *Waste Management and Resource Recycling in the Developing World*, 601-623. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90463-6.00004-X>
- Saidi, M., Gohari, M. H., & Ramezani, A. T. (2020). Hydrogen production from waste gasification followed by membrane filtration: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(5), 1529-1556. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01030-9>
- Sakhiya, A. K., Anand, A., & Kaushal, P. (2020). Production, activation, and applications of biochar in recent times. *Biochar*, 2, 253-285. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1>
- Santana, N. A., Jacques, R. J. S., Antonioli, Z. I., Martínez-Cordeiro, H., & Domínguez, J. (2020). Changes in the chemical and biological characteristics of grape marc vermicompost during a two-year production period. *Applied Soil Ecology*, 154, 103587. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103587>
- Schnell, M., Horst, T., & Quicker, P. (2020). Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. *Journal of environmental management*, 263, 110367. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110367>
- Sebastian, J., & Paul, L. (2021). Plastic recycling and regeneration. In *Sustainable Manufacturing* (pp. 315-341). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818115-7.00016-X>
- Serrano, D., Sanchez-Delgado, S., Horvat, A., Marugán-Cruz, C., Batuecas, E., Kelebopile, L., & Kwapinska, M. (2025). Non-recyclable municipal solid waste characterization and pyrolysis for energy recovery. *Bioresource Technology*, 415, 131641. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131641>

- Shahbaz, M., AlNouss, A., Ghiat, I., Mckay, G., Mackey, H., Elkhalfa, S., & Al-Ansari, T. (2021). A comprehensive review of biomass based thermochemical conversion technologies integrated with CO₂ capture and utilisation within BECCS networks. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105734. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105734>
- Sharma, B., Goswami, Y., Sharma, S., & Shekhar, S. (2021). Inherent roadmap of conversion of plastic waste into energy and its life cycle assessment: a frontrunner compendium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111070. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111070>
- Sharma, V., Tsai, M. L., Nargotra, P., Chen, C. W., Kuo, C. H., Sun, P. P., & Dong, C. D. (2022). Agro-industrial food waste as a low-cost substrate for sustainable production of industrial enzymes: a critical review. *Catalysts*, 12(11), 1373. <https://doi.org/10.3390/catal12111373>
- Shulman, V. L. (2019, January). Tire recycling. In *Waste* (pp. 489-515). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815060-3.00026-8>
- Siddiqua, A., Hahladakis, J. N., & Al-Attiya, W. A. K. (2022). An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 58514-58536. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21578-z>
- Sikarwar, V. S., Hrabovský, M., Van Oost, G., Pohořelý, M., & Jeremiáš, M. (2020). Progress in waste utilization via thermal plasma. *Progress in Energy and Combustion Science*, 81, 100873. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100873>
- Singh, P., Verma, P., Singh, R., Ahamad, A., & Batalhão, A. C. (Eds.). (2022). *Waste management and resource recycling in the developing world*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-03094-X>
- Soltanian, S., Kalogirou, S. A., Ranjbari, M., Amiri, H., Mahian, O., Khoshnevisan, B., ... & Aghbashlo, M. (2022). Exergetic sustainability analysis of municipal solid waste treatment systems: A systematic critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111975>
- Sorvari, J., & Wahlström, M. (2024). Industrial by-products. In *Handbook of recycling* (pp. 259-285). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85514-3.00044-0>

- Speight, J. G. (2020). Production of fuels from nonfossil fuel feedstocks. *The Refinery of the Future*, 391-426. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816994-0.00011-7>
- Sughosh, P., Lakshmikanthan, P., Anusree, N., Lekshmi, M. S., & Khuntia, H. K. (2025). Landfill waste management. In *Waste-to-Energy* (pp. 329-359). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22356-3.00014-2>
- Sulaiman, I. S. C., & Mohamad, A. (2020). The use of vermiwash and vermicompost extract in plant disease and pest control. In *Natural remedies for pest, disease and weed control* (pp. 187-201). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819304-4.00016-6>
- Talang, R. P. N., & Sirivithayapakorn, S. (2021). Environmental and financial assessments of open burning, open dumping and integrated municipal solid waste disposal schemes among different income groups. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127761. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127761>
- Tan, S., Hashim, H., Lee, C., Taib, M. R., & Yan, J. (2014). Economical and environmental impact of waste-to-energy (WTE) alternatives for waste incineration, landfill and anaerobic digestion. *Energy procedia*, 61, 704-708. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.947>
- Tang, Y. T., & Huang, C. (2024). Disposal of urban wastes. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 115-130. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00005-X>
- Tao Zhou, Youcai Zhao & Nyankson Eugene Atta. (2023). Chapter 15 - Recycling and cleaning process of polluted plastic from municipal solid wastes. *Resource Recovery Technology for Municipal and Rural Solid Waste*, 239-255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98978-7.00006-3>
- Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water research*, 203, 117525. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>
- Tezer, Ö., Karabağ, N., Öngen, A., Çolpan, C. Ö., & Ayol, A. (2022). Biomass gasification for sustainable energy production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(34), 15419-15433. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.158>

Tian, H., Wei, Y., Cheng, S., Huang, Z., Qing, M., Chen, Y., ... & Yang, Y. (2022). Optimizing the gasification reactivity of biochar: The composition, structure and kinetics of biochar derived from biomass lignocellulosic components and their interactions during gasification process. *Fuel*, 324, 124709. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124709>

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191-215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>

Trivedi, S. S., Snehal, K., Das, B. B., & Barbhuiya, S. (2023). A comprehensive review towards sustainable approaches on the processing and treatment of construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 393, 132125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132125>

Valarezo Ulloa, María José y Ruiz Virgen, Lazaro. (2022). Plastic recycling, a challenge to achieve a circular economy. *Plasticrecycling, a challenge to achieve a circular economy*. <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v12i2.1265>

Varjani, S., Shah, A. V., Vyas, S., & Srivastava, V. K. (2021). Processes and prospects on valorizing solid waste for the production of valuable products employing bio-routes: a systematic review. *Chemosphere*, 282, 130954. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130954>

Veljković, V. B., Banković-Ilić, I. B., Stamenković, O. S., & Hung, Y. T. (2021). Waste Vegetable oils, fats, and cooking oils in biodiesel production. In *Integrated Natural Resources Research* (pp. 147-263). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61002-9_5

Voss, R., Lee, R. P., Seidl, L., Keller, F., & Fröhling, M. (2021). Global warming potential and economic performance of gasification-based chemical recycling and incineration pathways for residual municipal solid waste treatment in Germany. *Waste Management*, 134, 206-219. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.040>

Wang, G., Dai, Y., Yang, H., Xiong, Q., Wang, K., Zhou, J., ... & Wang, S. (2020). A review of recent advances in biomass pyrolysis. *Energy & fuels*, 34(12), 15557-15578. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03107>

Xiang, W., Zhang, X., Chen, J., Zou, W., He, F., Hu, X., ... & Gao, B. (2020). Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere*, 252, 126539. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126539>

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, 141312. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141312>

Yadav, M., Joshi, C., Paritosh, K., Thakur, J., Pareek, N., Masakapalli, S. K., & Vivekanand, V. (2022). Organic waste conversion through anaerobic digestion: a critical insight into the metabolic pathways and microbial interactions. *Metabolic engineering*, 69, 323-337. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.11.014>

Yang, J., Zhang, Z., Wang, J., Zhao, X., Zhao, Y., Qian, J., & Wang, T. (2023). Pyrolysis and hydrothermal carbonization of biowaste: A comparative review on the conversion pathways and potential applications of char product. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, 101106. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101106>

Yıldız-Geyhan, E., Yılan, G., Altun-Çiftçioğlu, G. A., & Kadirgan, M. A. N. (2019). Environmental and social life cycle sustainability assessment of different packaging waste collection systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 143, 119-132. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.028>

Yuvaraj, A., Thangaraj, R., Ravindran, B., Chang, S. W., & Karmegam, N. (2021). Centrality of cattle solid wastes in vermicomposting technology—A cleaner resource recovery and biowaste recycling option for agricultural and environmental sustainability. *Environmental Pollution*, 268, 115688. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115688>

Zhang, R., Chen, Y., Lei, K., & Liu, D. (2017). The effects of specific surface area and ash on char gasification mechanisms in the mixture of H₂O, CO₂, H₂ and CO. *Fuel*, 209, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.085>

Zhang, Y., Cui, Y., Chen, P., Liu, S., Zhou, N., Ding, K., ... & Ruan, R. (2019). Gasification technologies and their energy potentials. In *Sustainable resource recovery and zero waste approaches* (pp. 193-206). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64200-4.00014-1>

Zhang, Y., Li, B., Li, H., & Liu, H. (2011). Thermodynamic evaluation of biomass gasification with air in autothermal gasifiers. *Thermochimica Acta*, 519(1-2), 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.005>

Zhang, Y., Zhao, Y., Gao, X., Li, B., & Huang, J. (2015). Energy and exergy analyses of syngas produced from rice husk gasification in an entrained flow reactor. *Journal of Cleaner Production*, 95, 273-280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.053>

Zhang, Z., Chen, Z., Zhang, J., Liu, Y., Chen, L., Yang, M., ... & Yap, P. S. (2024). Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa. *Science of the Total Environment*, 172794. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172794>

SOBRE LOS AUTORES

Fernando Antonio Sernaqué Auccahuasi es doctor en Ingeniería Ambiental, Maestro en Gestión Ambiental y en Gestión Pública; es Biólogo e Ingeniero Ambiental, especialista en residuos sólidos. Es docente universitario con más de 15 años de experiencia en programas de pregrado; además de; una sólida trayectoria como investigador en temas ambientales, sostenibilidad, salud pública y tecnologías aplicadas. Es autor de múltiples publicaciones científicas indexadas en Scopus. Ha participado como consultor ambiental para instituciones públicas y privadas, así como en proyectos de evaluación ambiental, gestión de residuos, conservación ecológica y educación ambiental. Se desempeñó como asesor del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Federico Villarreal, y ha ocupado cargos académicos y de gestión en diversas universidades peruanas. Es miembro activo del Colegio de Ingenieros del Perú y del Colegio de Biólogos del Perú. Actualmente, es coordinador general del grupo de investigación “Conservación Ecológica, Socio Ambiental y Divulgación Científica – CECOSAM” de la UNFV, desde donde promueve la investigación interdisciplinaria y la divulgación científica orientada al desarrollo sostenible.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1485-5854>

Marlitt Florinda Naupay Vega es doctora en Ingeniería Ambiental; Magister en Ciencias e Ingeniero Químico. Directora de la Unidad de Investigación Innovación y Emprendimiento de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV) También es miembro de la Sociedad Química del Perú. Docente universitario de pregrado y postgrado de la UNFV y post grado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Ponente en diferentes congresos. Asesora y jurado de tesis de doctorado, maestría y de pregrado de la UNFV. Asesora y Consultora en Energías Renovables, Evaluación de Impacto Ambiental, Sistemas de Gestión Ambiental, ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001 y Responsabilidad Social Empresarial. Con publicaciones científicas en revistas indexadas Scopus, Web of Science

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1234-5869>

Samuel Carlos Reyna Mandujano es docente e investigador con una sólida trayectoria en el ámbito ambiental, el desarrollo sostenible y la gestión pública. Cuenta con estudios de Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Maestría en Gestión Ambiental y Maestría en Gestión Pública, además de ser Ingeniero Ambiental e Ingeniero Civil. Es miembro del Colegio de Ingenieros del Perú y del Instituto Especializado de Investigación en Ecosistemas y Recursos Naturales (INERN-UNFV). Ha publicado investigaciones en revistas especializadas sobre temas como contaminación ambiental, microalgas y gestión de recursos naturales. Su experiencia abarca la dirección de proyectos de inversión pública, la consultoría ambiental, la docencia universitaria y la participación en comités técnicos y científicos. Como conferencista y ponente, ha contribuido a la discusión de políticas públicas, gestión ambiental y desarrollo sostenible. Su trabajo se caracteriza por el enfoque interdisciplinario, la innovación en la gestión de proyectos y el compromiso con la sostenibilidad ambiental.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0750-2877>

Karina Inés Hinojosa Pedraza es docente, investigadora y funcionaria pública, actualmente asesora del Vice Rectorado Académico de la Universidad Nacional Federico Villarreal, con más de 30 años de ejercicio profesional, cuenta con una Licenciatura en Derecho, Maestría en gestión en Técnicas Medioambientales, y con otros estudios culminados de maestría en Derecho Civil-Comercial y Doctorado en Derecho.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1237-9110>

RESIDUOS CON VALOR:

**Procesos de Recuperación y Aprovechamiento
en Contextos Urbanos y Rurales**



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

