



# GESTIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

ECONOMÍA CIRCULAR, INNOVACIÓN Y POLÍTICAS

Miguel Ángel Enríquez Estrella  
Hernán Patricio Ruiz Mármol  
Edwin Fernando Basantes Basantes  
David Sancho Aguilera



EDITORA  
ARTEMIS

2025



# GESTIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

ECONOMÍA CIRCULAR, INNOVACIÓN Y POLÍTICAS

Miguel Ángel Enríquez Estrella  
Hernán Patricio Ruiz Mármol  
Edwin Fernando Basantes Basantes  
David Sancho Aguilera



EDITORIA  
ARTEMIS

2025



O conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons Atribuição-Não-Comercial NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0). Direitos para esta edição cedidos à Editora Artemis pelos autores. Permitido o

download da obra e o compartilhamento, desde que sejam atribuídos créditos aos autores, e sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Este livro é produto de processos de investigação e pesquisa. A responsabilidade pelo conteúdo e dados, em sua forma, correção e confiabilidade é exclusiva dos autores. A Editora Artemis, em seu compromisso de manter e aperfeiçoar a qualidade e confiabilidade dos trabalhos que publica, conduz a avaliação cega pelos pares de todos manuscritos publicados, com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

**Editora Chefe** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora Executiva** M.<sup>a</sup> Viviane Carvalho Mocellin

**Direção de Arte** M.<sup>a</sup> Bruna Bejarano

**Diagramação** Elisangela Abreu

**Autores** Prof. Dr. Miguel Ángel Enríquez Estrella  
Prof. Dr. Hernán Patricio Ruiz Mármol  
Prof. Dr. Edwin Fernando Basantes Basantes  
Prof. Dr. David Sancho Aguilera

**Imagem da Capa** alexandrmusuc/123RF

**Bibliotecário** Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

#### Conselho Editorial

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ada Esther Portero Ricol, *Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba*

Prof. Dr. Adalberto de Paula Paranhos, *Universidade Federal de Uberlândia, Brasil*

Prof. Dr. Agustín Olmos Cruz, *Universidad Autónoma del Estado de México, México*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Amanda Ramalho de Freitas Brito, *Universidade Federal da Paraíba, Brasil*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Clara Monteverde, *Universidad de Buenos Aires, Argentina*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Júlia Viamonte, *Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal*

Prof. Dr. Ángel Mujica Sánchez, *Universidad Nacional del Altiplano, Peru*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Angela Ester Mallmann Centenaro, *Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Begoña Blandón González, *Universidad de Sevilla, Espanha*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carmen Pimentel, *Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Catarina Castro, *Universidade Nova de Lisboa, Portugal*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cirila Cervera Delgado, *Universidad de Guanajuato, México*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Neves, *Universidade Aberta de Portugal*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Padovesi Fonseca, *Universidade de Brasília-DF, Brasil*

Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, *Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil*

Dr. Cristo Ernesto Yáñez León – *New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, Estados Unidos*

Prof. Dr. David García-Martul, *Universidad Rey Juan Carlos de Madrid, Espanha*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Deuzimar Costa Serra, *Universidade Estadual do Maranhão, Brasil*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Dina Maria Martins Ferreira, *Universidade Estadual do Ceará, Brasil*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Edith Luévano-Hipólito, *Universidad Autónoma de Nuevo León, México*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eduarda Maria Rocha Teles de Castro Coelho, *Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal*

Prof. Dr. Eduardo Eugênio Spers, *Universidade de São Paulo (USP), Brasil*

Prof. Dr. Eloi Martins Senhoras, *Universidade Federal de Roraima, Brasil*





Prof.ª Dr.ª Elvira Laura Hernández Carballido, *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, México

Prof.ª Dr.ª Emilas Darlene Carmen Lebus, *Universidad Nacional del Nordeste/ Universidad Tecnológica Nacional*, Argentina

Prof.ª Dr.ª Erla Mariela Morales Morgado, *Universidade de Salamanca*, Espanha

Prof. Dr. Ernesto Cristina, *Universidad de la República*, Uruguay

Prof. Dr. Ernesto Ramírez-Briones, *Universidad de Guadalajara*, México

Prof. Dr. Fernando Hitt, *Université du Québec à Montréal*, Canadá

Prof. Dr. Gabriel Díaz Cobos, *Universitat de Barcelona*, Espanha

Prof.ª Dr.ª Gabriela Gonçalves, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal

Prof.ª Dr.ª Galina Gumovskaya – Higher School of Economics, Moscow, Russia

Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

Prof.ª Dr.ª Gladys Esther Leoz, *Universidad Nacional de San Luis*, Argentina

Prof.ª Dr.ª Glória Beatriz Álvarez, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina

Prof. Dr. Gonçalo Poeta Fernandes, Instituto Politécnico da Guarda, Portugal

Prof. Dr. Gustavo Adolfo Juárez, *Universidad Nacional de Catamarca*, Argentina

Prof. Dr. Guillermo Julián González-Pérez, *Universidad de Guadalajara*, México

Prof. Dr. Håkan Karlsson, *University of Gothenburg*, Suécia

Prof.ª Dr.ª Iara Lúcia Tescarollo Dias, Universidade São Francisco, Brasil

Prof.ª Dr.ª Isabel del Rosario Chiyon Carrasco, *Universidad de Piura*, Peru

Prof.ª Dr.ª Isabel Yohena, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina

Prof. Dr. Ivan Amaro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Prof. Dr. Iván Ramon Sánchez Soto, *Universidad del Bío-Bío*, Chile

Prof.ª Dr.ª Ivânia Maria Carneiro Vieira, Universidade Federal do Amazonas, Brasil

Prof. Me. Javier Antonio Alborno, *University of Miami and Miami Dade College*, Estados Unidos

Prof. Dr. Jesús Montero Martínez, *Universidad de Castilla - La Mancha*, Espanha

Prof. Dr. João Manuel Pereira Ramalho Serrano, Universidade de Évora, Portugal

Prof. Dr. Joaquim Júlio Almeida Júnior, UniFIMES - Centro Universitário de Mineiros, Brasil

Prof. Dr. Jorge Ernesto Bartolucci, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México

Prof. Dr. José Cortez Godínez, Universidad Autónoma de Baja California, México

Prof. Dr. Juan Carlos Cancino Díaz, Instituto Politécnico Nacional, México

Prof. Dr. Juan Carlos Mosquera Feijoo, *Universidad Politécnica de Madrid*, Espanha

Prof. Dr. Juan Diego Parra Valencia, *Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín*, Colômbia

Prof. Dr. Juan Manuel Sánchez-Yáñez, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, México

Prof. Dr. Juan Porras Pulido, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México

Prof. Dr. Júlio César Ribeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil

Prof. Dr. Leinig Antonio Perazolli, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil

Prof.ª Dr.ª Lívia do Carmo, Universidade Federal de Goiás, Brasil

Prof.ª Dr.ª Luciane Spanhol Bordignon, Universidade de Passo Fundo, Brasil

Prof. Dr. Luis Fernando González Beltrán, *Universidad Nacional Autónoma de México*, México

Prof. Dr. Luis Vicente Amador Muñoz, *Universidad Pablo de Olavide*, Espanha

Prof.ª Dr.ª Macarena Esteban Ibáñez, *Universidad Pablo de Olavide*, Espanha

Prof. Dr. Manuel Ramiro Rodríguez, *Universidad Santiago de Compostela*, Espanha

Prof. Dr. Manuel Simões, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

Prof.ª Dr.ª Márcia de Souza Luz Freitas, Universidade Federal de Itajubá, Brasil

Prof. Dr. Marcos Augusto de Lima Nobre, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil

Prof. Dr. Marcos Vinicius Meião, Universidade Federal de Sergipe, Brasil

Prof.ª Dr.ª Mar Garrido Román, *Universidad de Granada*, Espanha

Prof.ª Dr.ª Margarida Márcia Fernandes Lima, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

Prof.ª Dr.ª María Alejandra Arecco, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina

Prof.ª Dr.ª Maria Aparecida José de Oliveira, Universidade Federal da Bahia, Brasil

Prof.ª Dr.ª Maria Carmen Pastor, *Universitat Jaume I*, Espanha

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maria da Luz Vale Dias – Universidade de Coimbra, Portugal  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maria do Céu Caetano, Universidade Nova de Lisboa, Portugal  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maria do Socorro Saraiva Pinheiro, Universidade Federal do Maranhão, Brasil  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> M<sup>ª</sup>Graça Pereira, Universidade do Minho, Portugal  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maria Gracinda Carvalho Teixeira, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> María Guadalupe Vega-López, *Universidad de Guadalajara, México*  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maria Lúcia Pato, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maritza González Moreno, *Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba*  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Mauriceia Silva de Paula Vieira, Universidade Federal de Lavras, Brasil  
 Prof. Dr. Melchor Gómez Pérez, Universidad del Pais Vasco, Espanha  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Ninfa María Rosas-García, Centro de Biotecnología Genómica-Instituto Politécnico Nacional, México  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Odara Horta Boscolo, Universidade Federal Fluminense, Brasil  
 Prof. Dr. Osbaldo Turpo-Gebera, *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Peru*  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Patrícia Vasconcelos Almeida, Universidade Federal de Lavras, Brasil  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Paula Arcoverde Cavalcanti, Universidade do Estado da Bahia, Brasil  
 Prof. Dr. Rodrigo Marques de Almeida Guerra, Universidade Federal do Pará, Brasil  
 Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares, Universidade Federal do Piauí, Brasil  
 Prof. Dr. Sergio Bitencourt Araújo Barros, Universidade Federal do Piauí, Brasil  
 Prof. Dr. Sérgio Luiz do Amaral Moretti, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Silvia Inés del Valle Navarro, *Universidad Nacional de Catamarca, Argentina*  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Solange Kazumi Sakata, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)- USP, Brasil  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Stanislava Kashtanova, *Saint Petersburg State University, Russia*  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Susana Álvarez Otero – Universidad de Oviedo, Espanha  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Teresa Cardoso, Universidade Aberta de Portugal  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Teresa Monteiro Seixas, Universidade do Porto, Portugal  
 Prof. Dr. Valter Machado da Fonseca, Universidade Federal de Viçosa, Brasil  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Vanessa Bordin Viera, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
 Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Vera Lúcia Vasilévski dos Santos Araújo, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil  
 Prof. Dr. Wilson Noé Garcés Aguilar, *Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Colômbia*  
 Prof. Dr. Xosé Somoza Medina, Universidad de León, Espanha

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

G393 Gestión de residuos agroindustriales [livro eletrônico] : economía circular, innovación y políticas / Miguel Ángel Enríquez Estrella... [et al.]. – 1. ed. – Curitiba, PR : Editora Artemis, 2025.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-81701-78-9

DOI 10.37572/EdArt\_121225789

1. Sustentabilidade agroindustrial. 2. Gestão ambiental. 3. Valorização de resíduos. 4. Economia circular. 5. Inovação tecnológica. 6. Políticas públicas ambientais. I. Enríquez Estrella, Miguel Ángel. II. Ruiz Mármol, Hernán Patricio. III. Basantes Basantes, Edwin Fernando. IV. Sancho Aguilera, David.

CDD 338.1

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**



## PRÓLOGO

La agroindustria contemporánea enfrenta uno de los mayores desafíos de la era moderna: la gestión responsable de los residuos generados en sus procesos productivos. Durante décadas, estos subproductos fueron considerados desechos sin valor, asociados a impactos negativos sobre el suelo, el agua y la atmósfera. Sin embargo, la transición hacia modelos de economía circular y bioeconomía ha transformado esta visión, posicionando a los residuos agroindustriales como recursos estratégicos para la innovación, la sostenibilidad y la competitividad global.

Este libro surge como una respuesta integral a esa necesidad. A lo largo de sus capítulos, se abordan los fundamentos teóricos y científicos que sustentan la valorización de residuos, las tecnologías emergentes que permiten convertirlos en productos de alto valor agregado como biocombustibles, bioplásticos, biofertilizantes y compuestos bioactivos, y las normativas nacionales e internacionales que regulan su manejo. Además, se exploran las estrategias de gestión integral, los indicadores de sostenibilidad y las tendencias futuras, incluyendo la aplicación de inteligencia artificial, nanotecnología y biología sintética en la agroindustria.

El propósito de esta obra es ofrecer una guía técnica y práctica para investigadores, profesionales, estudiantes y tomadores de decisiones que buscan implementar soluciones sostenibles en el sector agroindustrial. Más que un compendio de información, este libro es una invitación a repensar la relación entre producción y medio ambiente, promoviendo un modelo donde los residuos dejan de ser un problema para convertirse en oportunidades.

Confiamos en que este trabajo contribuya a la construcción de sistemas agroindustriales más resilientes, responsables y alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, fortaleciendo la seguridad alimentaria, la protección de los recursos naturales y la mitigación del cambio climático.

Miguel Ángel Enríquez Estrella

Hernán Patricio Ruiz Mármol

Edwin Fernando Basantes Basantes

David Sancho Aguilera

## ABREVIATURAS

**UNEP:** United Nations Environment Programme – Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

**ISO:** International Organization for Standardization – Organización Internacional de Normalización

**PHVA:** Planificar – Hacer – Verificar – Actuar

**MAATE:** Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (Ecuador)

**COA:** Código Orgánico del Ambiente

**GAD:** Gobiernos Autónomos Descentralizados

**MAG:** Ministerio de Agricultura y Ganadería

**FAOLEX:** Base de datos jurídica de la FAO sobre legislación agroalimentaria

**MAE:** Ministerio del Ambiente

**SGA:** Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos

**COOTAD:** Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización

**ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible

**GEI:** Gases de Efecto Invernadero

**AME:** Asociación de Municipalidades del Ecuador

**BID:** Banco Interamericano de Desarrollo

**UNOPS:** United Nations Office for Project Services

## SUMÁRIO

### GESTIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES: ECONOMÍA CIRCULAR, INNOVACIÓN Y POLÍTICAS

Miguel Ángel Enríquez Estrella

Hernán Patricio Ruiz Mármol

Edwin Fernando Basantes Basantes

David Sancho Aguilera

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_121225789](https://doi.org/10.37572/EdArt_121225789)

#### **CAPÍTULO 1.....1**

##### **RESIDUOS AGROINDUSTRIALES**

##### **1.1. CONCEPTUALIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES..... 1**

##### **1.2. IMPORTANCIA DEL MANEJO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES.....3**

##### **1.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DE LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES..... 3**

##### **1.4. CLASIFICACIÓN SEGÚN ORIGEN: VEGETAL, ANIMAL, MIXTO ..... 4**

###### **1.4.1. Residuos vegetales .....5**

###### **1.4.2. Residuos Animales ..... 6**

###### **1.4.3. Residuos Mixtos .....7**

##### **1.5. IMPACTO AMBIENTAL, ECONÓMICO Y SOCIAL .....7**

##### **1.6. LEGISLACIÓN Y NORMATIVAS NACIONALES E INTERNACIONALES..... 11**

###### **1.6.1. Normativas Nacionales .....11**

##### **1.7. OBJETIVOS DEL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE ..... 13**

###### **1.7.1. Policultivos y diversificación de cultivos ..... 15**

###### **1.7.2. Uso de biofertilizantes y microorganismos eficientes ..... 15**

###### **1.7.3. Prácticas agroecológicas y mitigación del cambio climático ..... 16**

###### **1.7.4. Toneladas de compost generadas..... 16**



<b>1.8. BENEFICIOS DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>20</b>
<b>ECONOMÍA CIRCULAR Y TECNOLOGÍAS PARA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES</b>	
<b>2.1. PRINCIPIOS DE ECONOMÍA CIRCULAR Y SOSTENIBILIDAD INDUSTRIAL .....</b>	<b>20</b>
2.1.2. Integración de sostenibilidad y economía circular en la industria.....	21
2.1.3. Valorización de subproductos y residuos.....	21
2.1.4. Ecoeficiencia y ecodiseño como principios estratégicos.....	22
2.1.5. Tecnologías limpias y energías renovables.....	22
<b>2.2. TECNOLOGÍAS LIMPIAS Y PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON SISTEMAS BIOLÓGICOS Y FÍSICO-QUÍMICOS.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4. APROVECHAMIENTO DE BIOMASA PARA GENERAR ENERGÍA RENOVABLE .....</b>	<b>25</b>
<b>2.5. COMPOSTAJE CONTROLADO PARA PRODUCIR ENMIENDAS ORGÁNICAS .....</b>	<b>27</b>
2.5.1. Importancia del compostaje en la agroindustria .....	27
2.5.2. Etapas del compostaje controlado.....	28
2.5.3. Innovaciones en el compostaje agroindustrial.....	29
2.5.4. Digestión anaerobia para obtener biogás y biofertilizantes.....	30
2.5.5. Separación y secado de subproductos para recuperar fibras vegetales, aceites y compuestos bioactivos.....	32
<b>2.6. CADENAS DE VALOR EN LA AGROINDUSTRIA.....</b>	<b>35</b>
2.6.1. Etapas de la cadena de valor .....	35
<b>2.7. INNOVACIÓN TECNOLÓGICA Y BIOTECNOLÓGICA.....</b>	<b>37</b>

2.7.1. Contexto y relevancia.....	37
<b>2.8. INNOVACIÓN TECNOLÓGICA APLICADA A RESIDUOS AGROINDUSTRIALES.....</b>	<b>37</b>
2.8.1. Biorrefinerías integradas.....	38
2.8.2. Nanotecnología .....	38
2.8.3. Extracción con fluidos supercríticos .....	39
<b>2.9. AVANCES BIOTECNOLÓGICOS EN LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS ..</b>	<b>39</b>
<b>2.10. TENDENCIAS GLOBALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>40</b>
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>41</b>
<b>APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES</b>	
<b>3.1. IMPORTANCIA .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA.....</b>	<b>43</b>
3.3.1. Bagazo de caña.....	43
3.3.2. Cachaza .....	45
3.3.3. Vinaza.....	46
<b>3.4. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA CACAOTERA Y CAFETERA.....</b>	<b>47</b>
<b>3.5. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA FRUTÍCOLA Y HORTÍCOLA .....</b>	<b>48</b>
<b>3.6. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA LÁCTEA.....</b>	<b>50</b>
3.6.1. Producción de alimentos funcionales y bebidas fermentadas.....	51
3.6.2. Obtención de proteínas y péptidos bioactivos .....	52
3.6.3. Sustrato para biotecnología.....	53
3.6.4. Elaboración de bioplásticos y biofilms.....	54
3.6.5. Aplicaciones agrícolas .....	54

3.7. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA CÁRNICA .....	56
3.8. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE GRASAS Y ACEITES .....	58
3.9 RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE CEREALES Y OLEAGINOSAS.....	59
3.10. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE PECES Y MARISCOS .....	60
3.11. SÍNTESIS GLOBAL DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES.....	62
3.12. PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS .....	64
3.12.1. Fermentación.....	64
3.12.2. Compostaje.....	64
3.12.3. Pirolisis .....	65
3.12.4. Secado .....	66
3.12.5. Extracción ácido láctico alcohólico.....	66
3.12.6. Extracción asistida (UAE, MAE).....	67
3.12.7. Destilación.....	67
3.12.8. Maceración .....	68
3.12.9. Ultrafiltración .....	69
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>70</b>
<b>GESTIÓN INTEGRAL Y POLÍTICAS PARA LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES</b>	
<b>4.1. GESTIÓN INTEGRAL .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2. MARCO NORMATIVO DEL DEL ECUADOR .....</b>	<b>71</b>
4.2.1. Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva – 2021.....	72
4.2.2. Código orgánico del ambiente.....	73
4.2.3. Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria (LORSA) .....	74
4.2.4. Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de Desechos Sólidos No Peligrosos.....	74

4.2.5. Acuerdo Ministerial No. 177 (Producción Orgánica Agropecuaria) .....	75
4.2.6. Ordenanzas Municipales y Manuales Técnicos .....	75
<b>4.3. MARCO NORMATIVO INTERNACIONAL .....</b>	<b>77</b>
4.3.1. Normativas en Estados Unidos.....	77
4.3.2. Normativas en Europa.....	81
4.3.3. Normativas en Asia.....	85
4.3.4. Normativas en Medio Oriente .....	86
<b>4.4. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN INTEGRAL.....</b>	<b>88</b>
<b>4.5. NORMATIVA ISO 14001 EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES.....</b>	<b>89</b>
<b>4.6. INCENTIVOS ECONÓMICOS Y FISCALES EN EL MANEJO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES.....</b>	<b>91</b>
4.6.1. Exoneraciones tributarias y deducciones fiscales:.....	91
4.6.2. Créditos preferenciales y líneas de financiamiento verde: .....	92
4.6.3. Subsidios y fondos concursables: .....	92
4.6.4. Certificación y etiquetado verde: .....	92
4.6.5. Incentivos por reducción de emisiones: .....	92
<b>4.7. ROL DE LOS GOBIERNOS NACIONALES E INTERNACIONALES EN EL MANEJO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES .....</b>	<b>93</b>
<b>4.8. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD Y ECONOMÍA CIRCULAR .....</b>	<b>95</b>
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>99</b>
<b>INNOVACIÓN Y TENDENCIAS FUTURAS</b>	
<b>5.1. INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y BIG DATA EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS...99</b>	
5.1.1. Gestión Inteligente de Datos en la Agroindustria.....	99
5.1.2. Aplicación de IA en Clasificación y Mantenimiento Predictivo.....	100

<b>5.2. ECONOMÍA CIRCULAR Y MODELOS PREDICTIVOS .....</b>	<b>102</b>
5.2.1. Modelos predictivos .....	102
<b>5.3. BIOLOGÍA SINTÉTICA Y NANOTECNOLOGÍA PARA BIOPRODUCTOS....</b>	<b>104</b>
5.3.1. Biología sintética: diseño y aplicaciones.....	104
5.3.2. Nanotecnología aplicada a bioproductos .....	105
<b>5.4. PROYECCIONES GLOBALES DEL MANEJO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES (2030–2050).....</b>	<b>107</b>
<b>5.5. DIGITALIZACIÓN TOTAL DE PLANTAS AGROINDUSTRIALES .....</b>	<b>108</b>
<b>5.6. CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS POR ROBOTS .....</b>	<b>109</b>
<b>5.7. TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN LA GESTIÓN Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES.....</b>	<b>110</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>113</b>
<b>SOBRE OS AUTORES .....</b>	<b>125</b>



# CAPÍTULO 1

## RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

### 1.1. CONCEPTUALIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

En el contexto de la agroindustria moderna, los residuos agroindustriales representan una categoría de subproductos que, aunque tradicionalmente considerados desechos, poseen un alto potencial de valorización. Estos residuos son generados durante las etapas de producción, procesamiento, transformación y comercialización de productos agrícolas, pecuarios y forestales. Su composición varía ampliamente según el tipo de materia prima utilizada, el proceso industrial aplicado y las condiciones locales de producción (Castells, 2012).

La conceptualización de los residuos agroindustriales ha evolucionado desde una visión meramente contaminante hacia una perspectiva estratégica que los reconoce como recursos aprovechables dentro de modelos de economía circular y bioeconomía. En este sentido, se entiende por residuo agroindustrial cualquier material orgánico o inorgánico que, tras cumplir su función principal en el proceso productivo, puede ser reutilizado, transformado o valorizado mediante tecnologías físicas, químicas o biológicas (Enríquez et al., 2019).

Estos residuos pueden clasificarse según su origen en tres grandes grupos: vegetales (como cáscaras, pulpas, bagazo, hojas), animales (como huesos, grasas, lactosuero) y mixtos (combinaciones de residuos orgánicos e inorgánicos). Su acumulación sin tratamiento adecuado puede generar impactos negativos en el ambiente, como la contaminación de suelos y cuerpos de agua, emisión de gases de efecto invernadero y

proliferación de vectores patógenos. Sin embargo, su adecuada gestión y aprovechamiento pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad del sector agroindustrial, reduciendo la huella ecológica y generando nuevas oportunidades económicas (Corredor y Pérez, 2018).

La conceptualización moderna de estos residuos implica también una revisión de las normativas ambientales, los estándares de calidad y las políticas públicas que regulan su manejo. En este marco, el aprovechamiento sostenible de los residuos agroindustriales se convierte en una herramienta clave para la innovación, la competitividad y la transición hacia una agroindustria más responsable y resiliente. Diversos estudios han demostrado que el tratamiento eficiente de estos residuos permite la obtención de productos de alto valor agregado como biocombustibles, alimentos funcionales, bioplásticos, materiales biodegradables y compuestos bioactivos (Bacca y España, 2024).

En el marco de la agroindustria contemporánea, los residuos agroindustriales se entienden como subproductos generados en las distintas etapas de la cadena productiva agrícola, pecuaria y forestal: desde la cosecha y el procesamiento hasta la transformación y comercialización (Corredor y Pérez, 2018). Aunque históricamente fueron considerados desechos sin valor, hoy se reconocen como recursos estratégicos dentro de modelos de economía circular y bioeconomía, capaces de ser transformados en productos con valor agregado, tanto económico como ambiental y social.

Según Saval (2012), estos residuos se definen como materiales sólidos o líquidos obtenidos del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, que ya no son útiles para el proceso que los generó, pero que pueden ser aprovechados o transformados para obtener nuevos productos con valor comercial o funcional. Esta visión moderna implica una revalorización de los residuos como insumos para nuevas cadenas productivas, promoviendo la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de recursos.

## 1.2. IMPORTANCIA DEL MANEJO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

El manejo adecuado de los residuos agroindustriales es fundamental para reducir los impactos ambientales, optimizar recursos y promover la sostenibilidad económica y social. Según Molina-Morejón et al. (2025), una gestión eficiente basada en la bioeconomía circular permite la valorización de subproductos, disminuye la contaminación y genera nuevas oportunidades de negocio, alineándose con modelos internacionales como el propuesto por Ellen MacArthur. Aguiar et al., (2022) destacan que la falta de control en la disposición de estos residuos incrementa la contaminación del suelo y agua, mientras que su aprovechamiento mediante tecnologías como la producción de biocombustibles, bioplásticos y bioenergía contribuye a la economía circular en países como Ecuador. Romero-Sáez (2022) enfatiza que la magnitud global de residuos agroindustriales, especialmente en cultivos como caña de azúcar y arroz, representa un desafío y una oportunidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero y generar valor agregado. Por su parte, Alcántara-Revilla et al. (2022) advierten que el manejo inadecuado implica altos costos ambientales y económicos, proponiendo la instalación de plantas de procesamiento para disminuir la huella de carbono. Finalmente, Galaviz-Villa et al. (2025) señalan que la transformación de estos residuos en bioenergía, alimentos para animales y productos innovadores es clave para el desarrollo sostenible, aunque persisten barreras tecnológicas y regulatorias en América Latina.

## 1.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DE LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Los residuos agroindustriales presentan propiedades físico-químicas y microbiológicas que determinan su potencial de aprovechamiento. Los residuos vegetales suelen tener alta humedad (40–80%), elevado contenido de carbono y lignina, y una relación C/N generalmente alta (40–80), lo que favorece procesos como compostaje y digestión anaerobia, aunque la presencia de lignina reduce la biodegradabilidad y requiere pretratamientos.

Su pH oscila entre 5.1 y 10.4, y contienen nutrientes como N, P y K, además de compuestos fenólicos útiles para biofertilizantes y biosorción. Por otro lado, los residuos animales presentan humedad superior al 60%, baja relación C-N (6–15) y alto contenido proteico y graso, lo que los hace ideales para biodigestión, aunque puede generar inhibición por amoníaco si no se mezclan con residuos vegetales. Microbiológicamente, ambos tipos contienen bacterias y hongos que aceleran la degradación; la inoculación con microorganismos lignocelulolíticos mejora la conversión de residuos vegetales, la tabla 1 presenta sus propiedades.

Tabla 1. Propiedades de los residuos agroindustriales.

Propiedad	Residuos vegetales	Residuos animales
Humedad (%)	40–80	60–90
Relación C-N	40–80 (alta)	6–15 (baja)
Composición	Alto contenido de carbono, lignina y celulosa	Proteínas, grasas y alta DQO
Biodegradabilidad	Media (requiere pretratamiento)	Alta (con riesgo de inhibición por NH <sub>3</sub> )
pH	5.1–10.4	6.5–8.0
Carga microbiana	Hongos y bacterias lignocelulolíticas	Bacterias fermentativas y patógenas

#### 1.4. CLASIFICACIÓN SEGÚN ORIGEN: VEGETAL, ANIMAL, MIXTO

La clasificación de los residuos agroindustriales es un paso fundamental para su adecuada gestión y valorización. Esta categorización permite identificar las características físicas, químicas y biológicas de los subproductos generados en la agroindustria, facilitando su tratamiento, reutilización o transformación en nuevos productos. Según Aguiar et al. (2022), los residuos agroindustriales pueden dividirse en tres grandes grupos: vegetales, animales y mixtos, cada uno con particularidades que determinan su potencial de aprovechamiento. Distinguir entre residuo, subproducto y desecho permite establecer estrategias de valorización, optimización de recursos y reducción de impactos ambientales, la tabla 2 indica los conceptos de los elementos.

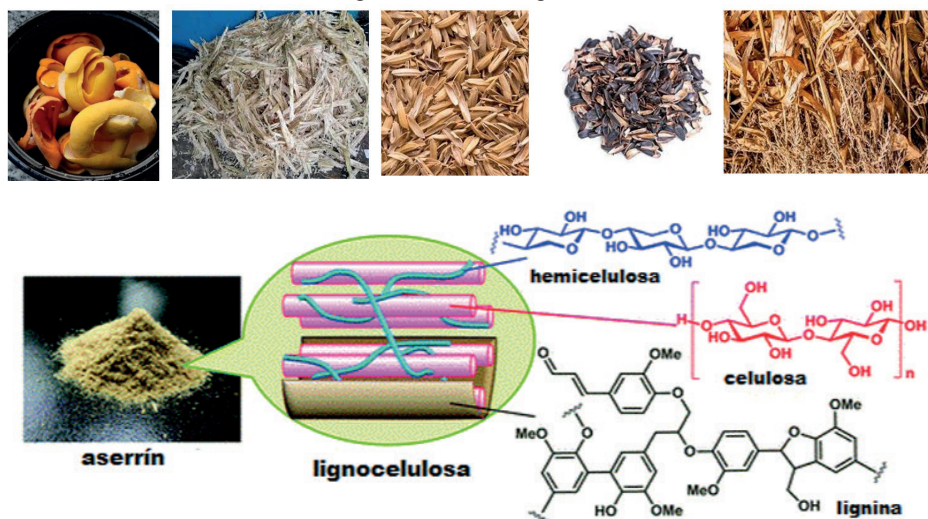
Tabla 2. Diferenciación de conceptos.

Término	Concepto	Diferenciación	Ejemplo
Residuo	Material generado en un proceso productivo que no tiene un uso inmediato, pero puede ser valorizado mediante tratamiento o transformación.	<b>Potencial de aprovechamiento:</b> Puede convertirse en insumo para otros procesos.	Cáscaras de frutas utilizadas para obtener pectina.
Subproducto	Material secundario obtenido intencionalmente o como parte del proceso principal, con valor comercial o funcional sin requerir tratamiento complejo.	<b>Valor económico directo:</b> Se comercializa o usa sin grandes modificaciones.	Melaza generada en la producción de azúcar.
Desecho	Material sin valor económico ni posibilidad técnica de aprovechamiento, destinado a disposición final (relleno sanitario o incineración).	<b>Carencia de utilidad:</b> No es viable su reutilización o reciclaje.	Mezcla contaminada de lodos industriales.

### 1.4.1. RESIDUOS VEGETALES

Proviene de la transformación de productos agrícolas y forestales. Incluyen cáscaras, pulpas, bagazo, hojas, tallos, semillas, estopas y fibras, estos residuos son ricos en materia lignocelulósica, compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (Figura 1).

Figura 1. Residuos vegetales.





El bagazo de caña de azúcar, subproducto fibroso generado tras la extracción del jugo de la caña (*Saccharum officinarum*), representa una de las fuentes más abundantes de biomasa lignocelulósica en países productores como Brasil, India, México y Perú. Este residuo, que constituye entre el 26% y el 29% del peso total de la caña molida, ha sido tradicionalmente utilizado como combustible en calderas industriales. Sin embargo, su composición química lo convierte en un recurso estratégico para aplicaciones de mayor valor agregado y menor impacto ambiental (Resano et al., 2022).

Desde el punto de vista fisicoquímico, el bagazo industrial (BCI) contiene aproximadamente 42.91% de celulosa, 27.92% de hemicelulosa y 9.74% de lignina, mientras que el bagazo artesanal (BCA) presenta valores ligeramente inferiores: 29.80% de celulosa, 20.61% de hemicelulosa y 5.70% de lignina. Estas proporciones lo hacen especialmente apto para procesos de hidrolización enzimática, fermentación, pirolisis, y compostaje, entre otros (Resano et al., 2022).

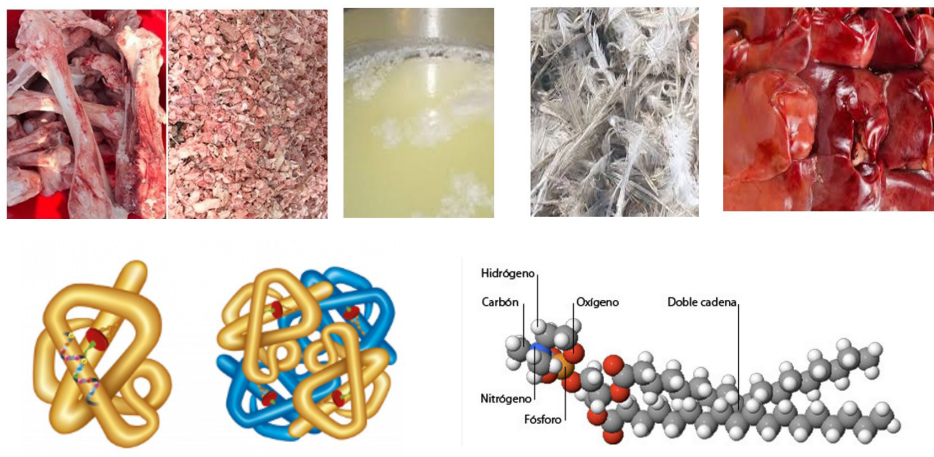
En el ámbito de los biocombustibles, la celulosa y hemicelulosa del bagazo pueden ser convertidas en azúcares fermentables mediante pretratamientos físicos y químicos, como la hidrólisis ácida. Estos azúcares son luego fermentados para producir bioetanol de segunda generación, una alternativa renovable a los combustibles fósiles. Estudios recientes han demostrado que el bagazo puede alcanzar rendimientos de hasta 5.69 g/L de ácido láctico en fermentaciones controladas, lo que evidencia su potencial para la producción de bioproductos como ácidos orgánicos y enzimas industriales (Vera Dueñas et al., 2024).

#### 1.4.2. RESIDUOS ANIMALES

Se generan en la transformación de productos pecuarios y lácteos. Incluyen huesos, grasas, lactosuero, pieles, sangre, estiércol y plumas. Estos residuos son ricos en proteínas, lípidos y minerales (Figura 2), y pueden ser utilizados en la producción de alimentos para animales, fertilizantes orgánicos, biogás y productos farmacéuticos. El lactosuero, por ejemplo, representa hasta el 85% del volumen de leche utilizada en la producción

de queso y contiene proteínas de alto valor biológico, siendo aprovechado para la elaboración de bebidas fermentadas, suero en polvo y bioetanol.

Figura 2. Residuos animales.



### 1.4.3. RESIDUOS MIXTOS

Son aquellos que combinan componentes orgánicos e inorgánicos. Incluyen lodos, vinazas, aguas residuales, cenizas, residuos de calderas y subproductos de procesos industriales complejos (Figura 3). Estos residuos presentan desafíos técnicos para su tratamiento, pero también oportunidades para la generación de energía, recuperación de nutrientes y producción de materiales de construcción.

Figura 3. Residuos mixtos.



## 1.5. IMPACTO AMBIENTAL, ECONÓMICO Y SOCIAL

El crecimiento industrial ha representado un motor esencial para el desarrollo de las sociedades contemporáneas, generando bienestar

económico y social. Sin embargo, este mismo proceso ha traído consigo un incremento sostenido en la generación de residuos, particularmente en el sector agroindustrial (Figura 4). Estos residuos, en su mayoría orgánicos, constituyen un desafío ambiental debido a los efectos negativos que pueden generar cuando no son gestionados adecuadamente. En este contexto, la investigación desarrollada por Alcántara-Revilla, Mejía-Benavides, Chávez-García y Castillo-Llerena (2022) se orienta a analizar el aprovechamiento adecuado de los residuos agroindustriales con el fin de minimizar su impacto en el medio ambiente y contribuir a la sostenibilidad de las empresas del sector.

Figura 4. Contaminación ambiental.



La agricultura agroindustrial, según la conceptualización de Saval Bohórquez (2012), se entiende como una actividad financiera que articula los procesos agrícolas e industriales con el objetivo de generar productos destinados al mercado. Esta definición implica una visión integral del sistema productivo, donde no solo se considera la transformación de materia prima, sino también la generación de subproductos y residuos que, si son gestionados adecuadamente, pueden adquirir un valor económico, social y ambiental significativo. Sin embargo, en la práctica, la disposición inadecuada de estos residuos continúa siendo una problemática persistente en el sector agroindustrial, generando efectos adversos sobre los componentes biológicos, físicos y sociales de los ecosistemas. La acumulación y manejo

deficiente de residuos puede provocar la contaminación del suelo, el agua y el aire, además de contribuir a la proliferación de microorganismos patógenos, olores desagradables y riesgos sanitarios, como lo señalan Barragán Huerta et al. (2008) y Guerrero & Valenzuela (2011). La quema de residuos, por ejemplo, libera grandes cantidades de dióxido de carbono y otros gases contaminantes, afectando directamente la calidad del aire y acelerando el cambio climático.

Desde una perspectiva económica, los residuos agroindustriales representan un desafío considerable para las empresas del sector. Cornejo Ramírez (2012) destaca que el manejo de estos residuos implica elevados costos de disposición y cumplimiento normativo, lo que se traduce en una carga financiera constante. No obstante, esta misma problemática puede convertirse en una fuente de oportunidades si se adoptan tecnologías sostenibles para su recuperación y transformación. Ramírez Bayas (2012) subraya que la valorización de residuos impulsa el desarrollo de innovaciones tecnológicas orientadas al aprovechamiento racional de los recursos naturales, promoviendo así la sostenibilidad y competitividad del sector agroindustrial. En este contexto, la implementación de estrategias de economía circular se vuelve crucial, ya que permite reincorporar los residuos en nuevos ciclos productivos, reduciendo la dependencia de insumos externos y mejorando la eficiencia del sistema.

Existen tres grandes grupos de métodos para la valorización de residuos agroindustriales: el beneficio químico y biológico, la producción de hidrocarburos a partir de biomasa, y el beneficio térmico. El beneficio químico y biológico incluye procesos como el compostaje, la lombricultura y la extracción de compuestos de alto valor agregado como aceites esenciales, enzimas, pectinas, fibras y flavonoides. Estos procesos no solo permiten recuperar materiales útiles, sino que también contribuyen a la mejora de la calidad del suelo y a la reducción del uso de fertilizantes químicos. La producción de hidrocarburos, por su parte, se enfoca en la generación de biogás y biocombustibles, ofreciendo una alternativa energética renovable que disminuye la dependencia de combustibles fósiles.

El estudio de Alcántara-Revilla et al. (2022) aporta una visión metodológica robusta al abordar la gestión de residuos agroindustriales desde una perspectiva multidisciplinaria. La investigación se desarrolló con una población compuesta por especialistas de diversas áreas empresariales, quienes participaron en entrevistas y evaluaciones cualitativas para analizar alternativas de manejo de residuos. Se utilizaron criterios de evaluación de impacto ambiental, ponderación de aprovechamiento de residuos y análisis económico del proyecto, lo que permitió identificar las percepciones y prioridades de cada área. Desde la administración, se reconoció que los residuos representan un costo fijo creciente; el área de marketing destacó la importancia de vincular el manejo de residuos con la producción orgánica y la imagen ambiental de la empresa; la producción agrícola valoró el potencial de los residuos para mejorar la fertilidad del suelo; y las áreas de logística e innovación coincidieron en que la disposición actual genera impactos negativos, riesgos laborales y un uso ineficiente de los recursos.

Los resultados del estudio revelaron que las empresas analizadas generaban aproximadamente 138,7 toneladas métricas diarias de residuos agroindustriales, provenientes principalmente de productos como pimienta, cereza, mango, piña y gandul. Esta cantidad de desechos representa un problema sanitario y logístico considerable, ya que implica altos costos de disposición en rellenos sanitarios. El costo total de disposición se estimó en 157,67 soles por tonelada métrica, lo que representa un gasto anual superior a siete millones de soles para la empresa evaluada. Además, este sistema de eliminación contribuye a la degradación del suelo y a la emisión de gases de efecto invernadero, exacerbando los problemas ambientales y comprometiendo la sostenibilidad del modelo productivo.

Como solución a esta problemática, se propuso la implementación de una planta de aprovechamiento de residuos sólidos agroindustriales, con capacidad para procesar 100 toneladas diarias. La inversión total estimada asciende a 1 millón de dólares, distribuidos en 500.000 USD de inversión fija,



50.000 USD en intangibles y 120.000 USD en capital de trabajo. El proyecto se financiaría a 15 años con una tasa del 12% anual, y su análisis financiero arrojó una relación beneficio-costos (B/C) de 2,38, lo que demuestra su rentabilidad y viabilidad económica. Esta planta permitiría transformar los residuos en productos útiles, reducir los costos de disposición, mejorar la imagen ambiental de la empresa y generar beneficios sociales al promover empleos verdes y prácticas sostenibles.

Entre las alternativas evaluadas para el aprovechamiento de residuos se consideraron opciones como la producción de biogás, colorantes naturales, alimentos balanceados, glicerol, 1,3-propanodiol, polihidroxibutirato (PHB) y compost. Tras la ponderación de criterios de riesgo, inversión y sostenibilidad ambiental, se concluyó que la opción más viable era el compostaje.

## 1.6. LEGISLACIÓN Y NORMATIVAS NACIONALES E INTERNACIONALES

### 1.6.1. NORMATIVAS NACIONALES

En Ecuador, el marco legal para el manejo de residuos agroindustriales se ha consolidado progresivamente, integrando principios constitucionales, leyes orgánicas y reglamentos técnicos que buscan garantizar un ambiente sano y ecológicamente equilibrado. La Constitución de la República del Ecuador establece en su artículo 14 el derecho de la población a vivir en un ambiente sano, reconociendo la sostenibilidad y el “buen vivir” (*Sumak kawsay*) como pilares fundamentales del desarrollo. Este principio se refuerza en el artículo 66, numeral 27, que garantiza a las personas el derecho a un entorno libre de contaminación y en armonía con la naturaleza (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

El Código Orgánico del Ambiente (COA), promulgado como respuesta a la dispersión normativa histórica, constituye actualmente la norma más importante en materia ambiental. Este código establece políticas generales de gestión integral de residuos y desechos, obligatorias para todas las instituciones del Estado, empresas privadas y personas

naturales. En su artículo 225, se promueve la eliminación o disposición final de residuos lo más cerca posible de su fuente de generación, mientras que el artículo 229 define las fases de gestión, desde la generación hasta la disposición final, con énfasis en la prevención de impactos ambientales y riesgos a la salud humana. Además, el artículo 238 responsabiliza directamente al generador de residuos peligrosos y especiales, exigiendo su manejo ambiental desde el origen hasta la eliminación, bajo el principio de jerarquización (Código Orgánico del Ambiente, 2021).

Complementariamente, existen reglamentos y acuerdos ministeriales que detallan procedimientos específicos. El Acuerdo Ministerial No. 026 regula el registro de generadores de desechos peligrosos como requisito previo al licenciamiento ambiental (Ministerio del Ambiente, 2008). El Acuerdo Ministerial No. 142 establece listados nacionales de sustancias químicas peligrosas y desechos especiales (Ministerio del Ambiente, 2012). La norma técnica NTE INEN 2266 define los requisitos para el transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos, alineándose con el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA) y la Reglamentación Modelo de Naciones Unidas (INEN, 2013). El Acuerdo Ministerial No. 061, por su parte, reforma el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, estableciendo criterios de clasificación de residuos según sus características corrosivas, reactivas, tóxicas, inflamables, biológico-infecciosas y radioactivas (Ministerio del Ambiente, 2015).

Además, el COOTAD (Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización) otorga competencias exclusivas a los gobiernos autónomos descentralizados (GAD) en el manejo de desechos sólidos, planificación ambiental y prestación de servicios públicos relacionados con el saneamiento. Esto implica que los municipios deben implementar sistemas locales de recolección, tratamiento y disposición de residuos, en coordinación con el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), que actúa como autoridad ambiental nacional.

Esta articulación institucional es clave para garantizar la trazabilidad, el cumplimiento normativo y la valorización de residuos agroindustriales, especialmente en zonas rurales y productivas (COOTAD, 2010).

## **1.7. OBJETIVOS DEL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE**

El aprovechamiento sostenible de los residuos sólidos agroindustriales constituye una estrategia clave para transformar un problema ambiental en una oportunidad económica y social, alineándose con los principios de la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Este enfoque busca reducir la contaminación ambiental mediante la valorización de residuos, evitando su disposición en vertederos o su quema incontrolada, que genera emisiones de gases de efecto invernadero y lixiviados contaminantes. Asimismo, promueve la reintegración de estos materiales al ciclo productivo como insumos para nuevos procesos, tales como la producción de biocombustibles, biofertilizantes y bioplásticos, optimizando el uso de recursos naturales y disminuyendo la extracción de materias primas. En la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, un marco global adoptado en 2015 para promover el desarrollo sostenible en todas sus dimensiones: ambiental, social y económica, se detallaron los objetivos que están vinculados directamente con la gestión y aprovechamiento de residuos agroindustriales:

Tabla 3. Aporte de la valorización de residuos a los objetivos de desarrollo sostenible.

ODS	Descripción	Indicadores	Meta 2030	Relevancia para la valorización de residuos
ODS 1: Fin de la pobreza	Poner fin a la pobreza en todas sus formas y en todo el mundo.	% de familias rurales beneficiadas por proyectos de valorización de residuos (meta: $\geq 30\%$ ).	Reducir a la mitad la pobreza multidimensional.	La valorización crea nuevas fuentes de ingreso y oportunidades económicas rurales.
ODS 2: Hambre cero	Uso de compost y biofertilizantes para mejorar la productividad agrícola.	% de incremento en el rendimiento agrícola por uso de biofertilizantes (meta: $\geq 20\%$ ).	Aumentar productividad agrícola sostenible.	Aprovechar residuos orgánicos mejora suelos y producción de alimentos.
ODS 3: Salud y bienestar	Gestión segura de residuos peligrosos para proteger la salud humana.	% de residuos peligrosos tratados adecuadamente (meta: $\geq 95\%$ ).	Reducir riesgos por sustancias químicas y desechos.	Evita enfermedades derivadas de mala disposición de residuos.
ODS 6: Agua limpia y saneamiento	Reducción de lixiviados y contaminación hídrica.	% de reducción en parámetros DQO y DBO en aguas residuales (meta: $\geq 50\%$ ).	Mejorar la calidad del agua y reducir contaminación.	La valorización reduce vertidos y mejora sistemas de tratamiento.
ODS 7: Energía asequible y no contaminante	Producción de biogás y bioenergía.	% de energía generada a partir de residuos agroindustriales (meta: $\geq 15\%$ ).	Aumentar participación de energías renovables.	Residuos orgánicos sirven como fuente directa de bioenergía.
ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico	Generación de empleo rural y cadenas productivas sostenibles.	% de empleos creados en proyectos de aprovechamiento (meta: $\geq 10\%$ anual).	Promover empleo productivo y sostenible.	La cadena de valorización impulsa microempresas y economías locales.
ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	Implementación de tecnologías limpias y biorrefinerías.	% de plantas agroindustriales que adoptan tecnologías sostenibles (meta: $\geq 25\%$ ).	Incrementar industrias sostenibles e innovadoras.	La biorrefinería transforma residuos en productos de alto valor.

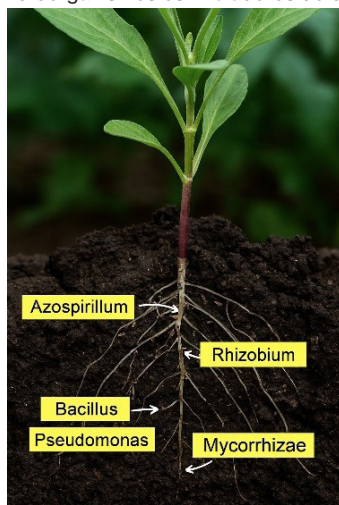
### 1.7.1. POLICULTIVOS Y DIVERSIFICACIÓN DE CULTIVOS

La práctica de policultivos consiste en cultivar diferentes especies en la misma parcela, lo que genera múltiples beneficios agronómicos y ecológicos. Esta estrategia reduce riesgos asociados a plagas, enfermedades y variabilidad climática, ya que la diversidad de especies actúa como una barrera natural frente a la propagación de patógenos (Tamayo y Alegre, 2022). Además, mejora la biodiversidad funcional del agroecosistema, favoreciendo la presencia de insectos benéficos, polinizadores y microorganismos del suelo. La diversificación también optimiza el uso de recursos como agua y nutrientes, disminuyendo la competencia y aumentando la eficiencia del sistema.

### 1.7.2. USO DE BIOFERTILIZANTES Y MICROORGANISMOS EFICIENTES

Los biofertilizantes son productos biológicos que contienen microorganismos vivos capaces de mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y estimular el crecimiento vegetal. Entre los más utilizados se encuentran bacterias fijadoras de nitrógeno (*Azospirillum*, *Rhizobium*), solubilizadoras de fósforo (*Bacillus*, *Pseudomonas*) y hongos micorrícicos que incrementan la absorción de agua y minerales, según se detalla en la figura 5.

Figura 5. Microorganismos estimuladores de crecimiento.





Su aplicación reduce la dependencia de fertilizantes químicos, disminuye los costos de producción y contribuye a la salud del suelo al mantener su microbiota activa (Muñoz, 2025). Además, estos microorganismos mejoran la estructura del suelo, incrementan la materia orgánica y favorecen procesos como la mineralización y la formación de agregados, esenciales para la fertilidad y la retención de humedad.

### 1.7.3. PRÁCTICAS AGROECOLÓGICAS Y MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Las prácticas agroecológicas integran principios ecológicos en la producción agrícola, buscando la sostenibilidad y la conservación de los recursos naturales. Entre ellas se incluyen la rotación de cultivos, el uso de abonos verdes, la cobertura vegetal y la incorporación de compost. Estas acciones no solo previenen la degradación del suelo, sino que también contribuyen a la captura de carbono, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. El incremento de la materia orgánica en el suelo actúa como sumidero de carbono, mientras que la disminución del uso de fertilizantes sintéticos reduce las emisiones de óxido nitroso, uno de los principales gases responsables del calentamiento global. De esta manera, la agroecología se convierte en una herramienta clave para enfrentar el cambio climático y garantizar la seguridad alimentaria (Altieri y Nicholls, 2000). Para garantizar que las prácticas de compostaje y el uso de biofertilizantes derivados de residuos agroindustriales contribuyan efectivamente a la sostenibilidad y la seguridad alimentaria, es indispensable establecer indicadores claros y medibles. Estos indicadores permiten evaluar no solo la eficiencia técnica del proceso, sino también su impacto económico, ambiental y social, alineándose con los objetivos del desarrollo sostenible, especialmente el ODS Hambre Cero.

### 1.7.4. TONELADAS DE COMPOST GENERADAS

Este indicador cuantifica la cantidad de compost producido a partir de residuos vegetales y agroindustriales la tabla 4 detalla sus indicadores:

Tabla 4. Indicadores y parámetros de impacto en la producción y calidad del compost.

Categoría	Variable de impacto	Importancia	Unidad de medida	Valor
Producción y aprovechamiento	Cantidad de compost producido	Indica la eficiencia del sistema y el aprovechamiento de residuos vegetales y agroindustriales.	Toneladas/año	500 t/año
	Residuos transformados	Mide la cantidad de residuos que se procesan en compostaje, reduciendo vertidos y emisiones.	Toneladas/año	500 t/año
	Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> equivalente	Cuantifica el impacto ambiental positivo al evitar descomposición no controlada.	Toneladas de CO <sub>2</sub> eq./año	250 t CO <sub>2</sub> eq./año
	Tasa de aprovechamiento de residuos	Porcentaje de residuos orgánicos valorizados mediante compostaje.	%	80–90 %
Contribución a la economía circular	Reincorporación de materia orgánica	Cantidad de compost usada como fertilizante orgánico, reduciendo insumos químicos.	Toneladas/año	450 t/año
	Ahorro en insumos externos	Disminución del uso de fertilizantes sintéticos y enmiendas químicas.	%	20–40 % de reducción
Impacto ambiental positivo	Reducción de lixiviados contaminantes	Menor riesgo de contaminación del suelo y aguas subterráneas.	L/m <sup>2</sup> /año	Reducción del 60–70 %
	Disminución de residuos en vertederos	Medida de la reducción directa de desechos dispuestos.	Toneladas/año	500 t/año
Parámetros de calidad del compost	Relación C/N	Equilibrio entre carbono y nitrógeno que garantiza una adecuada descomposición y mineralización.	Relación (–)	25:1 – 30:1
	pH	Indica acidez o alcalinidad; valores neutros o ligeramente alcalinos son óptimos.	Unidades de pH	6.5 – 8.0
	Conductividad eléctrica (CE)	Evalúa la salinidad; niveles altos pueden afectar las plantas.	dS/m	< 4.0 dS/m
	Estabilidad y madurez	Refleja la finalización del proceso de compostaje y la ausencia de fitotoxicidad.	Índice de madurez (%)	> 80 %

Categoría	Variable de impacto	Importancia	Unidad de medida	Valor
	Contenido de materia orgánica	Mide la capacidad del compost de aportar nutrientes y mejorar la estructura del suelo.	%	40–60 %
	Ausencia de patógenos (E. coli, Salmonella)	Garantiza inocuidad para uso agrícola.	UFC/g	No detectables
	Metales pesados (Cd, Pb, Cr, Ni, Zn, Cu)	Controla la toxicidad y contaminación del suelo.	mg/kg	Cd < 1; Pb < 100; Cr < 150; Ni < 50; Zn < 300; Cu < 200

### 1.8. BENEFICIOS DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

El aprovechamiento de residuos agroindustriales mediante procesos como el compostaje y la producción de biofertilizantes no solo impacta positivamente en la productividad agrícola, sino que también genera beneficios ambientales y sociales significativos. Uno de los principales beneficios es la reducción de costos de producción, ya que el uso de insumos orgánicos derivados de residuos disminuye la dependencia de fertilizantes sintéticos, cuyo precio suele ser elevado y sujeto a variaciones en el mercado internacional. Esta sustitución permite a los agricultores optimizar sus recursos, mejorar la rentabilidad y reducir la vulnerabilidad económica frente a fluctuaciones externas. Además, el compost y los biofertilizantes aportan nutrientes esenciales y mejoran la estructura del suelo, lo que se traduce en una mayor eficiencia en el uso del agua y en la reducción de gastos asociados al riego y la corrección de suelos degradados (Alcantara et al., 2022).

Otro beneficio clave es la mitigación del cambio climático, ya que el compostaje evita la disposición inadecuada de residuos en vertederos o su quema, prácticas que generan emisiones de gases de efecto invernadero como metano y dióxido de carbono. Al transformar los residuos en productos

útiles, se reduce la liberación de lixiviados contaminantes y se promueve la captura de carbono en el suelo, contribuyendo a la disminución de la huella de carbono del sector agroindustrial. Estudios recientes señalan que la implementación de sistemas agroalimentarios sostenibles puede reducir hasta un tercio de las emisiones globales si se adoptan prácticas como el compostaje y la agroecología, lo que convierte esta estrategia en una herramienta fundamental para enfrentar la crisis climática y cumplir con los compromisos internacionales de reducción de emisiones (Chavez y Burbano, 2021).

El aprovechamiento de residuos agroindustriales impulsa la transición hacia sistemas agroecológicos, que favorecen la salud humana y ambiental. Estos sistemas se basan en principios de sostenibilidad, biodiversidad y resiliencia, integrando prácticas como la rotación de cultivos, el uso de abonos verdes y la incorporación de materia orgánica al suelo (Enríquez et al., 2019).

# CAPÍTULO 2

## ECONOMÍA CIRCULAR Y TECNOLOGÍAS PARA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

### 2.1. PRINCIPIOS DE ECONOMÍA CIRCULAR Y SOSTENIBILIDAD INDUSTRIAL

La economía circular se fundamenta en la idea de cerrar los ciclos de materiales y energía, evitando el modelo lineal tradicional de “extraer, producir, consumir y desechar”. Este enfoque busca mantener los recursos en uso el mayor tiempo posible, reducir la generación de residuos y minimizar el impacto ambiental. En lugar de considerar los desechos como un problema, la economía circular los concibe como insumos para nuevos procesos productivos, promoviendo la regeneración de sistemas naturales y la eficiencia en el uso de recursos. Entre sus principios básicos se incluyen: preservar y mejorar el capital natural, optimizar el rendimiento de los recursos y fomentar la eficacia del sistema mediante la eliminación de externalidades negativas. Esto implica diseñar productos duraderos, reparables y reciclables, así como implementar tecnologías limpias que reduzcan la huella ecológica, la figura 5 detalla el contenido.

Figura 6. Economía circular.

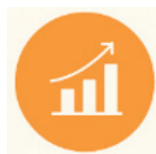


## 2.1.2. INTEGRACIÓN DE SOSTENIBILIDAD Y ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA

En el ámbito industrial, la sostenibilidad se integra con la economía circular para transformar los procesos productivos hacia modelos más responsables y resilientes. Este enfoque busca no solo cumplir con normativas ambientales, sino también convertir a las empresas en agentes de cambio hacia una economía baja en carbono y regenerativa. La sostenibilidad industrial se basa en tres pilares fundamentales: ambiental, económico y social, que interactúan para garantizar un desarrollo equilibrado y sostenible (Castro et al., 2024). Los tres pilares de la sostenibilidad industrial:



*Pilar ambiental:* Se orienta a reducir emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de agua y energía, y generación de residuos. Esto implica adoptar tecnologías limpias, sistemas de gestión ambiental y prácticas que minimicen el impacto ecológico.



*Pilar económico:* Busca mejorar la eficiencia y competitividad mediante la innovación, optimizando el uso de recursos y reduciendo costos operativos. La economía circular contribuye a este pilar al reincorporar materiales y subproductos en la cadena productiva.



*Pilar social:* Promueve condiciones laborales justas, seguridad ocupacional y bienestar de las comunidades, asegurando que la transición hacia modelos sostenibles sea inclusiva y equitativa.

Fuente: (Castro et al., 2024).

## 2.1.3. VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS Y RESIDUOS

Los subproductos y residuos constituyen uno de los pilares fundamentales de la economía circular aplicada a la industria, ya que permite reincorporar materiales descartados como materias primas secundarias, reduciendo la presión sobre los recursos naturales y disminuyendo la generación de desechos. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad

ambiental, sino que también genera beneficios económicos y sociales al promover la innovación tecnológica y la creación de empleos verdes.

En el sector agroindustrial, la valorización adquiere especial relevancia debido al alto volumen de residuos orgánicos generados en procesos como el beneficio de frutas, la producción de aceites, la molienda de granos y la extracción de jugos. Estos residuos pueden transformarse en productos de alto valor agregado, tales como compost, biofertilizantes, biogás, bioetanol y bioplásticos, contribuyendo a la reducción de la dependencia de insumos químicos y al fortalecimiento de la seguridad alimentaria (Alonso, 2019).

#### 2.1.4. ECOEFICIENCIA Y ECODISEÑO COMO PRINCIPIOS ESTRATÉGICOS

La economía circular fomenta la ecoeficiencia y el ecodiseño, principios que optimizan el uso de materiales y energía desde la etapa de diseño del producto. Esto incluye seleccionar materiales reciclables, reducir el número de componentes y facilitar la reparación y reutilización. El ecodiseño permite prolongar la vida útil de los productos y disminuir la generación de residuos, mientras que la ecoeficiencia busca maximizar la productividad con el mínimo impacto ambiental (Sarango, 2024).

#### 2.1.5. TECNOLOGÍAS LIMPIAS Y ENERGÍAS RENOVABLES

En paralelo, la sostenibilidad industrial impulsa la adopción de energías renovables, sistemas de gestión ambiental certificados y tecnologías de producción más limpia. Estas prácticas reducen la huella de carbono y mejoran la competitividad en mercados internacionales cada vez más exigentes en términos de responsabilidad ambiental. La integración de estas tecnologías no solo responde a regulaciones, sino que también posiciona a las empresas como líderes en innovación sostenible (Sarango, 2024).



## 2.2. TECNOLOGÍAS LIMPIAS Y PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

Las tecnologías limpias son sistemas, procesos y prácticas que reducen o eliminan la generación de contaminantes durante la producción, priorizando la eficiencia energética, el uso racional de recursos y la disminución de impactos ambientales. Se aplican en todas las etapas del ciclo de vida del producto: diseño, fabricación, uso y disposición final. Su objetivo es minimizar la huella ecológica mediante innovación tecnológica y sostenibilidad. En la agroindustria incluyen algunas tecnologías que se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Tecnologías sostenibles aplicadas en la agroindustria y sus variables de control.

Tecnología	Descripción	Procesos principales	Variables clave	Parámetros
Tratamiento de aguas residuales con sistemas biológicos y físico-químicos	Reduce la carga contaminante antes del vertido o reutilización, permitiendo recuperar agua para riego o procesos industriales y cumplir normativas ambientales.	Lodos activados, biodigestores, coagulación, floculación, filtración.	DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), sólidos suspendidos, pH, turbidez.	mg/L, NTU, unidades pH
Aprovechamiento de biomasa para generar energía renovable	Transforma residuos agroindustriales (bagazo, cáscaras, restos vegetales) en energía limpia, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de CO <sub>2</sub> .	Combustión directa, gasificación, digestión anaerobia.	Poder calorífico, humedad, contenido de cenizas.	MJ/kg, %, %
Compostaje controlado para producir enmiendas orgánicas	Transforma residuos orgánicos en compost estable y nutritivo, mejorando la estructura del suelo y reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos.	Compostaje aeróbico controlado (temperatura, humedad, aireación, volteo).	Relación C/N, temperatura, humedad, tiempo de maduración.	25:1–30:1, °C, %, días

Tecnología	Descripción	Procesos principales	Variables clave	Parámetros
Digestión anaerobia para obtener biogás y biofertilizantes	Convierte residuos orgánicos en biogás (energía renovable) y digestato (biofertilizante), reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero.	Fermentación anaerobia controlada por microorganismos metanogénicos.	Producción de biogás, concentración de metano, pH del digestato.	m <sup>3</sup> /día, %, unidades pH
Separación y secado de subproductos para recuperar fibras vegetales, aceites y compuestos bioactivos	Recupera componentes valiosos de los residuos (aceites esenciales, fibras, compuestos bioactivos) para usos alimentarios, cosméticos o farmacéuticos, generando valor agregado.	Centrifugación, filtración, extracción con solventes o fluidos supercríticos, secado térmico o por atomización.	Rendimiento de extracción, pureza del compuesto, humedad final.	%

### 2.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON SISTEMAS BIOLÓGICOS Y FÍSICO-QUÍMICOS

El tratamiento de aguas residuales en la agroindustria es esencial para reducir la carga contaminante antes de su vertido o reutilización. Los sistemas biológicos, como lodos activados y biodigestores, degradan la materia orgánica mediante microorganismos, mientras que los procesos físico-químicos (coagulación, floculación, filtración) eliminan sólidos suspendidos y compuestos tóxicos. Estos sistemas permiten recuperar agua para riego o procesos industriales, disminuyendo el consumo de agua fresca y cumpliendo normativas ambientales se presenta en la figura 6.

Figura 7. Aguas residuales.



2.4. APROVECHAMIENTO DE BIOMASA PARA GENERAR ENERGÍA RENOVABLE

La biomasa se define como la materia orgánica de origen vegetal o animal susceptible de ser utilizada como fuente de energía. En el ámbito agroindustrial, los residuos como bagazo de caña, cáscaras de frutas, restos vegetales y subproductos agrícolas representan una oportunidad estratégica para la generación de energía renovable. Este aprovechamiento contribuye a la transición hacia sistemas energéticos sostenibles, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), la tabla 6 presenta variables tecnológicas.

Tabla 6. Variables clave en tecnologías de aprovechamiento de residuos agroindustriales.

Tecnología	Descripción	Variables	Parámetro	Productos
Tratamiento de aguas residuales	Reducción de carga orgánica y contaminantes mediante procesos físico-químicos (coagulación-floculación, sedimentación, filtración) y biológicos (lodos activados, biodigestores).	DQO, DBO <sub>5</sub> , sólidos suspendidos, pH, turbidez, conductividad, temperatura.	mg/L, NTU, °C, µS/cm	Agua tratada reutilizable, lodos estabilizados, reducción de contaminantes y olores.

<b>Tecnología</b>	<b>Descripción</b>	<b>Variables</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Productos</b>
Aprovechamiento de biomasa agroindustrial	Conversión de bagazo, cáscaras y restos vegetales en energía mediante combustión, gasificación o digestión anaerobia.	Poder calorífico, contenido de humedad, contenido de cenizas, tamaño de partícula.	MJ/kg, %, %, mm	Energía térmica o eléctrica, cenizas minerales reutilizables, menor emisión de CO <sub>2</sub> .
Compostaje controlado para producir enmiendas orgánicas	Transformación aeróbica controlada de residuos orgánicos en compost estable y rico en materia orgánica.	Relación C/N, temperatura, humedad, oxigenación, pH, tiempo de maduración.	25:1–30:1, °C, %, %, días	Compost maduro, mejora de suelos, reducción de fertilizantes químicos y olores.
Digestión anaerobia para obtener biogás y biofertilizantes	Conversión anaerobia de residuos orgánicos en biogás (metano + CO <sub>2</sub> ) y digestato mediante consorcios microbianos.	Producción de biogás, concentración de CH <sub>4</sub> , pH del digestato, sólidos totales y volátiles, tiempo de retención hidráulica.	m <sup>3</sup> /día, %, unidades, %, días	Biogás para energía, digestato como biofertilizante, reducción de GEI y contaminación.
Separación y secado de subproductos	Recuperación de componentes de alto valor (fibras, aceites, compuestos bioactivos) mediante centrifugación, filtración o extracción con solventes / fluidos supercríticos.	Rendimiento de extracción, pureza del compuesto, humedad final, temperatura de secado.	%, °C	Fibras vegetales, aceites esenciales, compuestos bioactivos estables, valor agregado.
Reincorporación de subproductos minerales	Uso de cenizas y residuos sólidos ricos en minerales como fuente de nutrientes en suelos agrícolas.	Contenido de K, Ca, Mg, P, pH, conductividad eléctrica.	%,	Mejoramiento de fertilidad del suelo, cierre del ciclo de nutrientes, economía circular.
Control de emisiones y monitoreo ambiental	Evaluación de emisiones gaseosas y trazabilidad del impacto ambiental del proceso.	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , material particulado (PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> ).	ppm, mg/m <sup>3</sup>	Cumplimiento de normas ambientales, reducción del impacto atmosférico.

Fuente: (Dios, 2019)

## 2.5. COMPOSTAJE CONTROLADO PARA PRODUCIR ENMIENDAS ORGÁNICAS

El compostaje controlado es un proceso biológico aeróbico mediante el cual los residuos orgánicos se transforman en un producto estable, higienizado y rico en nutrientes, denominado compost. Este proceso se considera una de las tecnologías más eficientes para la valorización de residuos agroindustriales, ya que permite convertir materiales que tradicionalmente se consideran desechos en insumos agrícolas de alto valor, contribuyendo a la sostenibilidad, la economía circular y la mitigación del impacto ambiental. En el contexto agroindustrial, donde se generan grandes volúmenes de subproductos como bagazo, cáscaras, pulpas, estiércoles y restos vegetales, el compostaje controlado se presenta como una solución integral para reducir la contaminación, mejorar la fertilidad del suelo y disminuir la dependencia de fertilizantes químicos (FAO, 2013; Herrera & Gallardo, 2022).

### 2.5.1. IMPORTANCIA DEL COMPOSTAJE EN LA AGROINDUSTRIA

La agroindustria enfrenta el desafío de gestionar residuos orgánicos que, si no son tratados adecuadamente, pueden generar problemas como emisiones de gases de efecto invernadero, lixiviación de nutrientes y proliferación de patógenos se presenta en la figura 7. El compostaje controlado permite cerrar el ciclo de nutrientes, reincorporando al suelo elementos esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, además de mejorar su estructura física y capacidad de retención de agua. Este proceso contribuye a la regeneración de suelos degradados, incrementa la materia orgánica y favorece la actividad biológica, factores clave para la productividad agrícola y la resiliencia frente al cambio climático (Gutiérrez-González et al., 2024; Vargas-Pineda et al., 2019).

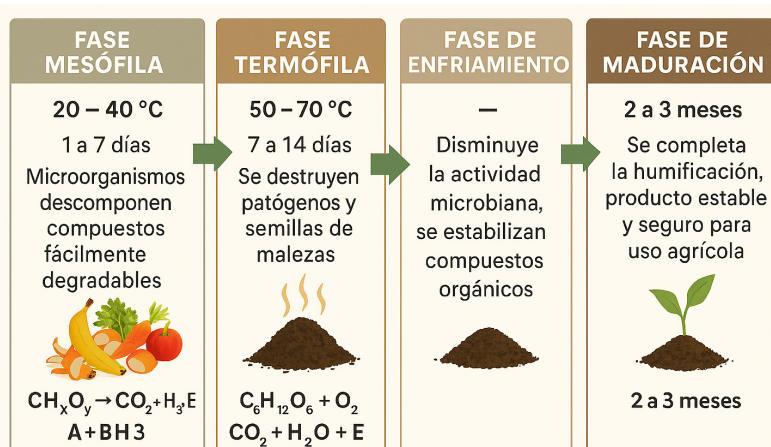
Figura 8. Ciclo del compostaje en la industria.



## 2.5.2. ETAPAS DEL COMPOSTAJE CONTROLADO

El compostaje es un proceso biológico controlado que transforma residuos orgánicos en un producto estable y rico en nutrientes, ideal para mejorar la fertilidad del suelo. Este esquema muestra las cuatro fases principales del compostaje: mesófila, termófila, enfriamiento y maduración, cada una con condiciones específicas de temperatura, tiempo y actividad microbiana (Colobon, 2025). Durante el proceso, ocurren reacciones químicas como la oxidación de compuestos orgánicos y la mineralización de nutrientes según se detalla en la figura 9, que permiten la formación de humus y la liberación de elementos esenciales para las plantas. Este ciclo contribuye a la sostenibilidad agrícola, reduce la generación de gases de efecto invernadero y promueve la economía circular en la agroindustria.

Figura 9. Etapas del compostaje.

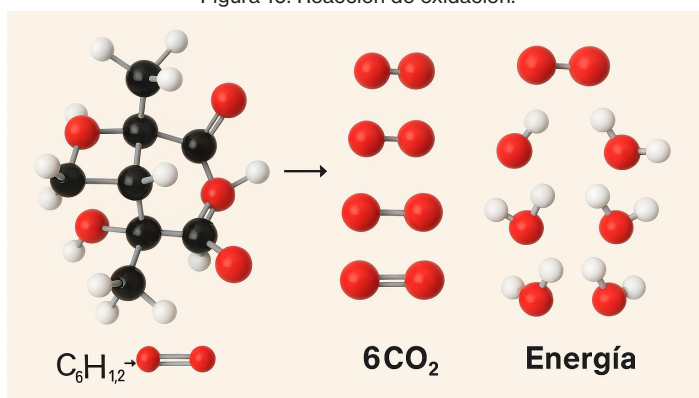


### 2.5.3. INNOVACIONES EN EL COMPOSTAJE AGROINDUSTRIAL

El compostaje es un proceso biológico aeróbico que transforma residuos orgánicos en un producto estable y rico en nutrientes, fundamental para la agricultura sostenible. Tradicionalmente, este proceso se desarrolla en cuatro fases: mesófila, termófila, enfriamiento y maduración, cada una caracterizada por variaciones en temperatura, actividad microbiana y reacciones químicas. Durante la fase mesófila (20–40 °C), bacterias y hongos descomponen compuestos fácilmente degradables, liberando dióxido de carbono y agua mediante reacciones de oxidación, según se detalla en la figura 9.



Figura 10. Reacción de oxidación.



En la fase termófila (50–70 °C), la actividad microbiana se intensifica, asegurando la higienización del material y la destrucción de patógenos y semillas de malezas. Posteriormente, en la fase de enfriamiento, disminuye la actividad metabólica y se estabilizan los compuestos orgánicos, mientras que en la fase de maduración se completa.

Investigaciones recientes han incorporado bioaumentación con microorganismos eficientes como *Bacillus*, *Azospirillum* y *Trichoderma*, que aceleran la descomposición y mejoran la calidad del compost al incrementar la mineralización de nutrientes y la producción de fitohormonas (auxinas, giberelinas) que favorecen la estructura del suelo y la disponibilidad de



nitrógeno. Estos microorganismos actúan como catalizadores biológicos, reduciendo el tiempo de maduración de 90 días a menos de 45 días en sistemas intensivos, gracias a la optimización de la relación carbono-nitrógeno (C:N) y el control de humedad y aireación (Raimondo et al., 2023; De la Vega Marzari, 2025) a humificación, obteniendo un compost seguro para uso agrícola.

#### 2.5.4. DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA OBTENER BIOGÁS Y BIOFERTILIZANTES

La digestión anaerobia es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, mediante el cual microorganismos especializados descomponen la materia orgánica presente en residuos agroindustriales, generando dos productos principales: biogás y digestato. El biogás está compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y constituye una fuente renovable de energía que puede emplearse para la generación de electricidad, calor o incluso ser purificado para producir biometano, apto para inyección en redes de gas natural. Por su parte, el digestato es un subproducto rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, que puede utilizarse como biofertilizante, contribuyendo a la fertilización orgánica y al cierre del ciclo de nutrientes en sistemas agrícolas sostenibles (Estrella, 2022).

Este proceso se desarrolla en biodigestores, que son reactores herméticos diseñados para mantener condiciones controladas de temperatura, pH y humedad, favoreciendo la actividad de los microorganismos anaerobios. La digestión anaerobia se lleva a cabo en cuatro etapas sucesivas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la hidrólisis, las macromoléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) se descomponen en compuestos más simples. Posteriormente, en la acidogénesis, estos productos son fermentados para generar ácidos grasos volátiles y alcoholes. La acetogénesis convierte estos compuestos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, que

finalmente son transformados en metano por bacterias metanogénicas durante la metanogénesis (Enríquez et al., 2022).

La aplicación de la digestión anaerobia en el aprovechamiento de residuos agroindustriales responde a la necesidad de reducir la acumulación de desechos orgánicos y mitigar su impacto ambiental. Residuos como estiércoles, purines, bagazo de caña, cáscaras de frutas, restos de cosechas y subproductos de la industria alimentaria son altamente biodegradables y constituyen sustratos idóneos para este proceso. Estudios han demostrado que la codigestión, es decir, la mezcla de diferentes tipos de residuos, mejora la eficiencia del proceso y la producción de biogás. Por ejemplo, la combinación de estiércol bovino con residuos de cosecha de tomate incrementó significativamente la producción de metano, alcanzando concentraciones superiores al 45%, adecuadas para su uso como combustible (Castro et al., 2020) en la tabla 7 se observa los elementos.

Tabla 7. Digestión anaerobia aplicada a residuos agroindustriales.

Categoría	Aspecto técnico	Descripción	Indicadores
Ambiental	Emisiones de GEI evitadas	Captura y aprovechamiento del metano generado en residuos orgánicos.	CH <sub>4</sub> con potencial 28× mayor que CO <sub>2</sub> .
	Reducción de emisiones totales	Uso de digestión anaerobia evita 21.900 kt CO <sub>2</sub> eq, ≈ 59 % de emisiones del sector agroganadero.	Toneladas de CO <sub>2</sub> evitadas por año.
	Sustitución de combustibles fósiles	Biogás empleado en motores o calderas reduce huella de carbono y dependencia energética.	1 m <sup>3</sup> de biogás = 6 kWh energía térmica (aprox.).
Agronómico	Producción de digestato	Subproducto semisólido con materia orgánica estabilizada y nutrientes N-P-K.	24,09 m <sup>3</sup> /ciclo (33 días) en biodigestores porcícolas.
	Seguridad fitosanitaria	Digestatos no presentan fitotoxicidad y cumplen normas sanitarias agrícolas.	Cumplimiento normativo / inocuidad.
	Efecto en el suelo	Mejora estructura, capacidad de retención de agua y microbiota del suelo.	+15–25 % capacidad de retención de agua.

Categoría	Aspecto técnico	Descripción	Indicadores
<b>Tecnológico</b>	Parámetros de operación	Temperatura mesofílica: 35–40 °C; termofílica: 50–55 °C; pH óptimo: 6.8–7.4; relación C/N: 20–30:1.	Control de proceso automatizado.
	Eficiencia de biogás	Rendimiento: 0,35–0,45 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV degradado.	Tasa de producción de metano.
	Innovaciones recientes	Pretratamientos: trituración, ultrasonido, maceración → mejora biodegradabilidad de lignocelulósicos (pajas, bagazo).	+10–25 % producción de biogás.
<b>Económico</b>	Costos de instalación	300–500 USD/m <sup>3</sup> de capacidad instalada (dependiendo del tipo de biodigestor).	Inversión inicial.
	Costos operativos	Reducción de gasto en fertilizantes químicos 20–30 %.	Ahorro en insumos agrícolas.
	Valor agregado	Generación de bioenergía y biofertilizantes; mejora de sostenibilidad agroindustrial.	Beneficio económico y ambiental combinado.
<b>Limitaciones</b>	Variabilidad de sustratos	Composición química diversa → puede alterar estabilidad del proceso.	Requiere análisis previo de sustratos.
	Riesgo de inhibición	Acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) si pH < 6,5.	Control de pH continuo.
	Necesidad de capacitación	Requiere manejo técnico especializado y monitoreo constante.	Formación profesional y control automatizado.
<b>Sostenibilidad y desarrollo</b>	Integración circular	Transforma residuos → energía + fertilizante; cierra ciclos productivos sostenibles.	Indicador de circularidad agroindustrial.
	Políticas públicas	Necesidad de incentivos económicos y apoyo técnico para adopción masiva.	Programas de biogás y biofertilizantes.

### 2.5.5. SEPARACIÓN Y SECADO DE SUBPRODUCTOS PARA RECUPERAR FIBRAS VEGETALES, ACEITES Y COMPUESTOS BIOACTIVOS

La agroindustria genera grandes volúmenes de subproductos durante el procesamiento de frutas, hortalizas, cereales y oleaginosas. Estos residuos, que incluyen cáscaras, bagazos, semillas y pulpas, son ricos en componentes de alto valor agregado como fibras dietéticas, aceites

esenciales y compuestos bioactivos (fenoles, carotenoides, flavonoides). Sin embargo, su disposición inadecuada contribuye a problemas ambientales y pérdidas económicas. Por ello, la separación y secado de estos subproductos se ha convertido en una estrategia clave para su valorización dentro del marco de la economía circular (Hernández, 2022).

#### **2.5.5.1. Importancia de la separación y secado en la valorización de residuos**

El primer paso para recuperar compuestos de interés es la separación física de las fracciones sólidas y líquidas presentes en los residuos. Esta etapa permite aislar las fibras vegetales, que son principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina, así como las fracciones lipídicas y compuestos solubles. Posteriormente, el secado reduce la humedad, inhibe el crecimiento microbiano y facilita la conservación y transporte del material. El secado también mejora la eficiencia de procesos posteriores como la molienda y la extracción de compuestos bioactivos, al disminuir la actividad de agua y evitar la degradación enzimática (Madera et al., 2023).

#### **2.5.5.2. Tecnologías de separación aplicadas a residuos agroindustriales**

Las tecnologías convencionales incluyen tamizado, centrifugación y filtración, que permiten separar partículas sólidas y líquidos. En el caso de fibras vegetales, se emplean procesos mecánicos como prensado y desintegración, seguidos de lavado para eliminar azúcares y compuestos solubles. Para aceites y extractos lipídicos, se utilizan métodos como prensado en frío y extracción con solventes. Sin embargo, estas técnicas presentan limitaciones como el uso intensivo de energía y solventes, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías verdes más sostenibles (Madera et al., 2023).

Entre las tecnologías emergentes destacan la extracción asistida por ultrasonido (EAU), microondas (EAM) y fluidos supercríticos

(EAFS). Estas técnicas permiten romper estructuras celulares y liberar compuestos bioactivos con menor consumo de solventes y tiempo. Por ejemplo, la extracción asistida por ultrasonido genera cavitación que facilita la liberación de fenoles y carotenoides, mientras que la extracción con CO<sub>2</sub> supercrítico es ideal para aceites esenciales, debido a su alta selectividad y ausencia de residuos tóxicos (Castro et al., 2020), la tabla 8 detalla las tecnologías.

Tabla 8. Tecnologías de separación.

Proceso	Descripción	Fundamentos	Avances tecnológicos	Aplicaciones industriales
Procesos de secado	Técnica utilizada para reducir la humedad y estabilizar subproductos agroindustriales. Incluye secado solar, por aire caliente, al vacío, liofilización y microondas.	Basado en las leyes de Fourier (transferencia de calor) y Fick (transferencia de masa), que describen los fenómenos de deshidratación en medios porosos.	- Secado al vacío preserva vitaminas y antioxidantes. - Liofilización conserva la estructura y funcionalidad de compuestos bioactivos. Modelos matemáticos y Superficie de Respuesta optimizan variables (temperatura, presión, HR).	Conservación de alimentos, producción de ingredientes deshidratados, reducción de pérdidas poscosecha, formulación de polvos funcionales.
Recuperación de fibras vegetales	Aprovechamiento de cáscaras, bagazos y residuos vegetales para extraer fibras con propiedades funcionales.	Propiedades fisicoquímicas relevantes: capacidad de retención de agua y aceite, hinchamiento y mejora textural en alimentos.	Métodos químicos (ácido y alcalino) y físicos (trituración, microondas). Se obtienen fibras con alta capacidad funcional.	Ingredientes funcionales en alimentos, aditivos estabilizantes, productos cosméticos y farmacéuticos.
Obtención de aceites y compuestos bioactivos	Extracción de aceites esenciales, polifenoles, carotenoides y flavonoides desde residuos agroindustriales (semillas, cáscaras).	Basado en principios de solubilidad selectiva y difusión molecular. Los compuestos tienen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas.	Sustitución de métodos tradicionales (Soxhlet, maceración) por tecnologías verdes: ultrasonido, microondas, fluidos supercríticos. Alta eficiencia y bajo consumo de solventes.	Producción de suplementos nutricionales, cosméticos naturales, aceites funcionales, conservantes alimentarios y productos farmacéuticos.

Proceso	Descripción	Fundamentos	Avances tecnológicos	Aplicaciones industriales
Aplicaciones industriales	Integración de productos derivados (fibras, aceites, compuestos bioactivos) en sectores alimentario, farmacéutico y cosmético.	Basadas en la bioactividad de los compuestos extraídos (flavonoides, polifenoles, carotenoides) y sus efectos antioxidantes.	Desarrollo de alimentos funcionales, suplementos y productos con valor agregado.	En alimentos, fármacos, cosméticos y aromaterapia; contribuyen a sostenibilidad y reducción de residuos.
Retos y perspectivas en la economía circular	Enfoque orientado a transformar residuos agroindustriales en materias primas de valor agregado.	Basado en principios de sostenibilidad, eficiencia energética y ciclo cerrado de recursos.	Implementación de procesos híbridos y tecnologías accesibles para PYMEs.	Alineación con Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y estrategias de bioeconomía.

2.6. CADENAS DE VALOR EN LA AGROINDUSTRIA

La cadena de valor que se genera a partir de la separación y secado de subproductos agroindustriales constituye un eje estratégico para la economía circular y la bioeconomía. Este proceso transforma residuos como cáscaras, bagazos, semillas y pulpas en insumos de alto valor agregado, reduciendo la presión sobre los recursos naturales y mitigando impactos ambientales. La valorización de estos subproductos no solo responde a criterios de sostenibilidad, sino que también abre oportunidades para la innovación tecnológica, la diversificación productiva y la creación de empleos verdes (Amato et al.,2024).

2.6.1. ETAPAS DE LA CADENA DE VALOR

La cadena de valor inicia con la recolección y clasificación de residuos agroindustriales, provenientes de procesos como el beneficio de frutas, la extracción de aceites, la molienda de granos y la producción de jugos. Estos residuos son ricos en fibras vegetales, aceites esenciales y

compuestos bioactivos (fenoles, carotenoides, flavonoides), lo que los convierte en materia prima para múltiples industrias.

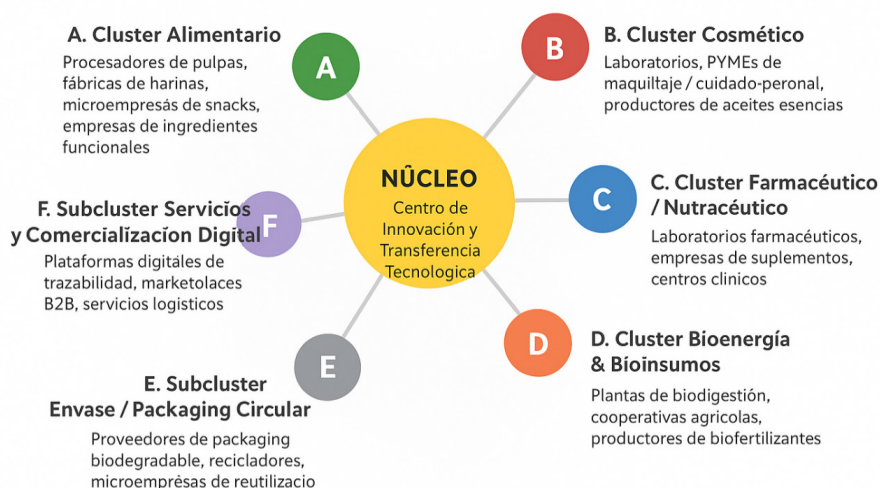
La segunda etapa corresponde a la separación física, mediante tecnologías como tamizado, centrifugación y filtración, que permiten aislar las fracciones sólidas y líquidas. En esta fase se obtienen fibras vegetales (celulosa, hemicelulosa, lignina) y extractos lipídicos.

Posteriormente, se realiza el secado controlado, que reduce la humedad, inhibe el crecimiento microbiano y facilita la conservación y transporte del material. Técnicas como secado al vacío, liofilización y microondas son preferidas por su capacidad para preservar compuestos termolábiles.

La cuarta etapa es la extracción de compuestos bioactivos y aceites, donde se aplican tecnologías verdes como ultrasonido, microondas y fluidos supercríticos, que reducen el consumo de solventes y mejoran la eficiencia. Estas técnicas permiten recuperar antioxidantes, pigmentos naturales y aceites esenciales con propiedades funcionales.

Finalmente, los productos obtenidos se integran en clusters industriales, según se detalla en la figura 10.

Figura 11. Cluster industriales.





## 2.7. INNOVACIÓN TECNOLÓGICA Y BIOTECNOLÓGICA

La agroindustria genera grandes volúmenes de residuos orgánicos e inorgánicos que, históricamente, fueron considerados desechos sin valor. Sin embargo, la transición hacia modelos de economía circular y bioeconomía ha impulsado una visión estratégica que reconoce estos residuos como insumos para la producción de bienes y servicios sostenibles (Corredor & Pérez, 2018). En este contexto, la innovación tecnológica y biotecnológica se ha convertido en un pilar fundamental para transformar los residuos agroindustriales en productos de alto valor agregado, reduciendo impactos ambientales y promoviendo la competitividad del sector.

### 2.7.1. CONTEXTO Y RELEVANCIA

El manejo inadecuado de residuos agroindustriales genera problemas ambientales como contaminación de suelos y aguas, emisión de gases de efecto invernadero y riesgos sanitarios (Barragán Huerta et al., 2008). Frente a ello, la innovación tecnológica ofrece soluciones que integran procesos físicos, químicos y biológicos para su valorización. Estas estrategias no solo disminuyen la carga contaminante, sino que también permiten la obtención de bioproductos como biocombustibles, bioplásticos, biofertilizantes y compuestos bioactivos (Bacca & España, 2024). La incorporación de tecnologías limpias y procesos biotecnológicos es clave para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en lo relacionado con producción responsable y acción climática.

## 2.8. INNOVACIÓN TECNOLÓGICA APLICADA A RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Las tecnologías emergentes han revolucionado la forma en que se gestionan los residuos agroindustriales. Entre las más destacadas se encuentran:

### 2.8.1. BIORREFINERÍAS INTEGRADAS

Plantas que transforman biomasa residual en múltiples productos, como bioetanol, biogás, bioplásticos y compuestos químicos. Este enfoque maximiza el aprovechamiento de la materia prima y reduce la dependencia de recursos fósiles (Grande Tovar, 2016).

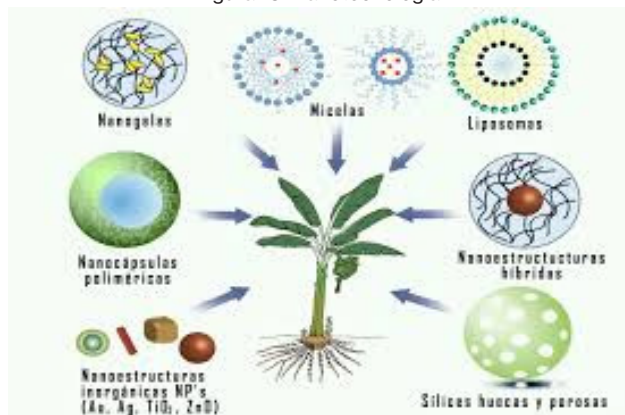
Figura 12. Biorrefinería.



### 2.8.2. NANOTECNOLOGÍA

Aplicada para desarrollar materiales biodegradables reforzados con nanopartículas, mejorando propiedades mecánicas y térmicas. Por ejemplo, la incorporación de nanofibras de celulosa en biopolímeros derivados de almidón incrementa su resistencia y estabilidad (Palazzolo et al., 2024).

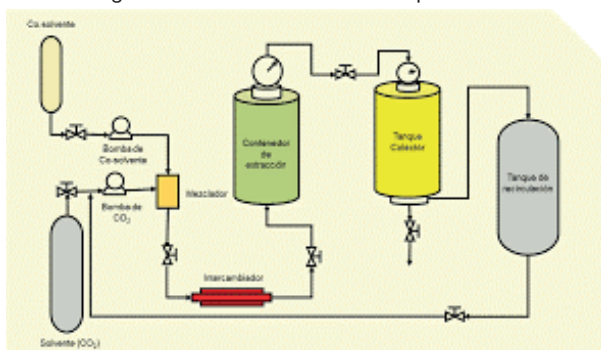
Figura 13. Nanotecnología.



### 2.8.3. EXTRACCIÓN CON FLUIDOS SUPERCRÍTICOS

Técnica avanzada para recuperar compuestos bioactivos (antioxidantes, flavonoides, aceites esenciales) presentes en residuos vegetales, sin generar contaminantes químicos (Romero-Sáez, 2022).

Figura 14. Extracción de fluidos supercríticos.



Inteligencia artificial y Big Data: Herramientas que optimizan procesos de fermentación, compostaje y logística de recolección, reduciendo costos y mejorando la eficiencia energética (Bustos Vázquez, 2024).

## 2.9. AVANCES BIOTECNOLÓGICOS EN LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS

La biotecnología ha desempeñado un papel crucial en la transformación de residuos agroindustriales mediante procesos biológicos controlados. Entre los más relevantes se destacan:

*Fermentación en estado sólido (FES):* Utilizada para producir enzimas industriales, ácidos orgánicos y bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos como bagazo de caña y cáscaras de frutas (Aguar et al., 2022).

*Compostaje y vermicompostaje:* Procesos biológicos que convierten residuos vegetales en abonos orgánicos ricos en nutrientes, mejorando la fertilidad del suelo y reduciendo el uso de fertilizantes químicos (Álvarez Godoy et al., 2007).

*Producción de biopolímeros:* Microorganismos como *Cupriavidus necator* sintetizan polihidroxibutirato (PHB) a partir de azúcares obtenidos de residuos agrícolas, generando plásticos biodegradables (Buenrostro Figueroa, 2025).

*Digestión anaerobia:* Técnica para producir biogás y biofertilizantes a partir de estiércol y residuos mixtos, contribuyendo a la generación de energía renovable y reducción de emisiones de metano.

## 2.10. TENDENCIAS GLOBALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En la última década, las publicaciones y proyectos relacionados con la valorización de residuos agroindustriales han crecido exponencialmente. Tecnologías como las biorrefinerías y la producción de bioplásticos muestran un incremento sostenido, impulsado por políticas ambientales y demanda de productos ecológicos (Bustos Vázquez, 2024). Según datos recientes, los proyectos de bioplásticos han aumentado más del 500% entre 2014 y 2024, mientras que las iniciativas de compostaje y bioenergía mantienen un crecimiento constante.

La integración de inteligencia artificial, biología sintética y nanotecnología promete revolucionar el sector en los próximos años, permitiendo procesos más eficientes y productos con propiedades mejoradas. Sin embargo, persisten desafíos como la falta de infraestructura tecnológica en países en desarrollo, altos costos iniciales y necesidad de normativas claras para garantizar la trazabilidad y seguridad de los productos.

En América Latina, y particularmente en Ecuador, el potencial es significativo debido a la abundancia de biomasa tropical y la creciente demanda de soluciones sostenibles. La articulación entre universidades, empresas y gobiernos será clave para consolidar proyectos de innovación que impulsen la competitividad regional.

# CAPÍTULO 3

## APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

### 3.1. IMPORTANCIA

El manejo y aprovechamiento de residuos agroindustriales se posiciona como un eje fundamental dentro de las políticas globales orientadas a la sostenibilidad y la economía circular. La agroindustria, caracterizada por su alta demanda de recursos, genera cantidades significativas de subproductos y desechos que, en ausencia de una gestión adecuada, se convierten en fuentes de contaminación para suelos, cuerpos de agua y atmósfera, además de incrementar la huella de carbono en las cadenas productivas (Aguilar et al., 2022). Frente a este escenario, la valorización de dichos residuos no solo constituye una estrategia ambiental, sino también una alternativa económica y tecnológica para transformar materiales de desecho en insumos útiles (Alcántara-Revilla et al., 2022).

Diversas investigaciones evidencian que la implementación de sistemas eficientes para el tratamiento de residuos agroindustriales contribuye a la reducción de costos operativos y a la mitigación de impactos ambientales. Entre las propuestas más destacadas se encuentra el diseño de plantas con capacidad para procesar hasta 100 toneladas diarias de residuos sólidos, lo que permitiría disminuir la carga contaminante y generar productos de valor agregado, tales como biofertilizantes, biocombustibles y materiales biodegradables (Alcántara-Revilla et al., 2022). Estas acciones se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y con la transición hacia modelos productivos más limpios y responsables.

La revisión bibliográfica reciente señala múltiples alternativas para la valorización de residuos provenientes de diferentes cadenas

agroindustriales. Los procesos termoquímicos y biotecnológicos ocupan un papel central, al posibilitar la obtención de metabolitos secundarios, compuestos bioactivos y energía renovable (Bacca Narváez y España Muñoz, 2024). En este sentido, estudios realizados en Colombia han identificado al menos 19 tipos de residuos con potencial para ser transformados mediante tecnologías verdes, lo que refleja la amplitud de oportunidades en este campo (Enríquez-Estrella et al., 2019).

Paralelamente, la economía circular se consolida como un paradigma esencial para redefinir la relación entre producción y medio ambiente. Expertos en la materia enfatizan que los residuos agroindustriales deben considerarse recursos estratégicos, capaces de cerrar ciclos productivos y reducir la dependencia de materias primas vírgenes (Aguiar et al., 2022). Esta visión ha impulsado el desarrollo de bioproductos innovadores, como bioplásticos elaborados a partir de mezclas de almidón y gelatina, reforzados con subproductos de frutas y café, que presentan propiedades mecánicas mejoradas y alta biodegradabilidad (Enríquez-Estrella et al., 2019).

Otra línea de investigación relevante es la recuperación de nutrientes esenciales (N, P y S) desde aguas residuales agroindustriales para la producción de biofertilizantes, una alternativa prometedora frente al cambio climático (Bacca Narváez & España Muñoz, 2024). De igual manera, el vermicompostaje de residuos orgánicos como café, lavanda y lúpulo se perfila como una solución sostenible para la agricultura regenerativa, reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos y favoreciendo la salud del suelo (Castro Rivera et al., 2020).

### 3.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS

La agroindustria es uno de los sectores productivos que más contribuye a la generación de residuos sólidos y líquidos, debido a la transformación masiva de materias primas agrícolas en productos de consumo. Este proceso implica el uso intensivo de recursos naturales y genera grandes volúmenes de subproductos que, en muchos casos, no son aprovechados adecuadamente. Según Aguiar et al., (2022), la

acumulación de estos desechos representa un problema ambiental crítico, ya que su disposición inadecuada puede provocar contaminación del suelo, alteración de cuerpos de agua y emisiones de gases de efecto invernadero, incrementando la huella de carbono de las cadenas productivas.

El impacto ambiental derivado de la generación de residuos agroindustriales se manifiesta en diferentes dimensiones. Por un lado, la descomposición de materia orgánica en vertederos produce lixiviados que contaminan acuíferos y suelos agrícolas, afectando la calidad del agua y la biodiversidad. Por otro, la liberación de metano y dióxido de carbono durante la degradación anaerobia contribuye al calentamiento global (Castro Rivera et al., 2020). Alcántara-Revilla et al. (2022) señalan que la falta de sistemas integrales de gestión incrementa estos riesgos, especialmente en regiones donde la agroindustria carece de infraestructura para el tratamiento de residuos.

Además, la magnitud del problema se amplifica por la diversidad de residuos generados: cáscaras, bagazos, semillas, aguas residuales y subproductos lignocelulósicos, cada uno con características físicas y químicas que dificultan su disposición final (Bacca Narváez y España Muñoz, 2024). Esta heterogeneidad exige soluciones tecnológicas adaptadas a cada tipo de residuo, lo que plantea retos para la sostenibilidad del sector.

En síntesis, la generación de residuos agroindustriales no solo implica un desafío ambiental, sino también económico y social. Su manejo inadecuado compromete la salud de los ecosistemas y la seguridad alimentaria, mientras que su aprovechamiento eficiente puede convertirse en una estrategia clave para reducir impactos y promover la economía circular (Enríquez-Estrella et al., 2019).

### **3.3. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA**

#### **3.3.1. BAGAJO DE CAÑA**

El bagazo de caña de azúcar, residuo fibroso generado tras la extracción del jugo en la industria azucarera, constituye uno de los



subproductos agroindustriales más abundantes a nivel mundial, con una producción estimada superior a 550 millones de toneladas anuales. Tradicionalmente, este material se utilizaba como combustible en los ingenios, pero los avances tecnológicos y la creciente demanda de soluciones sostenibles han impulsado su valorización en múltiples sectores, desde la bioenergía hasta la fabricación de biomateriales.

Su composición lignocelulósica aproximadamente 40-50% celulosa, 25-30% hemicelulosa y 20-25% lignina lo convierte en una materia prima estratégica para la producción de papel, cartón, bioplásticos y nanofibras, así como para la generación de biocombustibles de segunda generación. Este potencial responde a la necesidad de reducir la dependencia de recursos forestales y combustibles fósiles, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y a la economía circular.

Entre las aplicaciones más destacadas se encuentra la fabricación de papel y empaques biodegradables, donde el bagazo sustituye a la pulpa de madera, disminuyendo la deforestación y ofreciendo productos compostables en menos de 90 días. Asimismo, la obtención de nanofibras de celulosa mediante procesos químicos y mecánicos permite desarrollar biocompuestos con alta resistencia, utilizados en envases y materiales técnicos.

En el ámbito energético, el bagazo se emplea en cogeneración eléctrica en ingenios azucareros, aportando hasta el 15% de la demanda eléctrica en países como Brasil. Además, mediante pirólisis catalítica, se obtienen bioaceites con rendimientos superiores al 65% y poder calorífico de 20,5 MJ/kg, lo que lo posiciona como un recurso clave para la producción de combustibles renovables. Otra alternativa es la peletización, que facilita el almacenamiento y transporte, generando pellets con poder calorífico de 17-19 MJ/kg, en la tabla 9.

Tabla 9. Residuos derivados del bagazo de la caña de azúcar.

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Arena sanitaria ecológica	Secado y granulación	85 %	Procesamiento físico	Ecuador	Castro Rivera et al., 2020

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Bioaceite	Pirólisis catalítico	65,1 %	Reactor con clinoptilolita	Colombia	Alcántara-Revilla et al., 2022
Bioetanol 2G	Hidrólisis + fermentación	45–50 %	Pretratamiento ácido-enzimático	Brasil	Bacca Narváez & España Muñoz, 2024
Empaques biodegradables	Moldeo de pulpa	80–90 %	Prensado y termoformado	México	Enríquez-Estrella et al., 2019
Nanofibras de celulosa	Procesos químicos-mecánicos	70–75 %	Refinado y homogenización	Perú	Aguiar et al., 2022
Papel ecológico	Extracción química	75 %	NaOH + HCl + blanqueo	México	Alcántara-Revilla et al., 2022
Pellets energéticos	Compactación	85 %	Pelletización con SuperPro	Cuba	Castro Rivera et al., 2020

### 3.3.2. CACHAZA

Es el residuo sólido que se obtiene durante la clarificación del jugo de caña en el proceso de producción de azúcar. Está compuesta principalmente por fibras vegetales, tierra, compuestos orgánicos y minerales como calcio, fósforo y potasio. Este subproducto representa entre el 2 y 4 % del peso de la caña procesada, lo que implica grandes volúmenes en ingenios azucareros. Tradicionalmente, la cachaza se ha utilizado como enmienda orgánica en suelos agrícolas, pero su potencial va más allá: puede transformarse en fertilizantes orgánicos, biofertilizantes líquidos y fuente de minerales para alimentación animal. Tecnologías como el compostaje aeróbico y la digestión anaerobia permiten estabilizar la materia orgánica y reducir la carga microbiana, generando productos seguros y ricos en nutrientes. Su valorización contribuye a la economía circular según se detalla en la tabla 10, disminuye la disposición en vertederos y reduce impactos ambientales asociados a la contaminación del suelo y agua.

Tabla 10. Aprovechamiento de la cachaza en productos con valor agregado.

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Composta de cachaza	Compostaje aeróbico	90 %	Pilas con volteo y control de humedad	México	Hernández Melchor et al., 2008
Fertilizante orgánico (cachaza)	Aplicación directa al suelo	85–90 %	Secado y molienda	Costa Rica	CATSA, 2012
Biogás (cachaza + vinaza) *	Co-digestión anaerobia	65–70 % CH <sub>4</sub>	Reactor UASB (flujo ascendente)	Cuba	Pagés-Díaz et al., 2019
Cera refinada (cachaza)	Extracción química	180 g/T caña	Filtración y refinado	Bolivia	Pozo, 2017

\*Incluye vinaza como co-sustrato en el proceso de digestión anaerobia.

### 3.3.3. VINAZA

Es el efluente líquido generado en la destilación del alcohol a partir de melaza o jugo de caña. Por cada litro de etanol producido, se generan entre 10 y 15 litros de vinaza, lo que la convierte en uno de los residuos más voluminosos de la industria azucarera y alcoholera. Este subproducto presenta una alta carga orgánica (DQO y DBO elevadas), bajo pH y concentración significativa de potasio, lo que plantea retos para su disposición final, la tabla 11 contiene sus productos. Sin embargo, su composición la hace apta para aplicaciones sostenibles como riego controlado, producción de biofertilizantes líquidos y generación de biogás mediante digestión anaerobia. Tecnologías de neutralización química, filtración y biodigestión permiten reducir su impacto ambiental y aprovechar sus nutrientes.

Tabla 11. Aprovechamiento de la vinaza en productos con valor agregado.

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Biofertilizante líquido (vinaza)	Digestión anaerobia	75 %	Biodigestor tubular	Cuba	Pagés-Díaz et al., 2019
Fertirriego con vinaza	Aplicación en riego	80 %	Distribución controlada en suelos	Uruguay	Senatore et al., 2017

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Biofertilizante (vinaza)	Fermentación y acondicionamiento	70–75 %	Reactor anaerobio + separación	Ecuador	Alvarado Aguayo & Abad Sánchez, 2018

### 3.4. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA CACAOTERA Y CAFETERA

La industria cacaotera y cafetera genera importantes volúmenes de residuos durante el procesamiento de granos, entre los que destacan el mucílago, la cascarilla y la pulpa. Estos subproductos, tradicionalmente considerados desechos, poseen características químicas y funcionales que los convierten en insumos estratégicos para la producción de alimentos funcionales, biomateriales y biocombustibles, contribuyendo a la economía circular y la reducción del impacto ambiental.

El mucílago, rico en azúcares y compuestos solubles, se obtiene en la etapa de fermentación y clarificación. Estudios han demostrado su potencial para la extracción de pectinas mediante procesos ácido-alcohólicos, con rendimientos superiores al 18%, utilizadas en la industria alimentaria como agentes gelificantes (García, 2023). Además, su composición favorece la fermentación láctica para la elaboración de bebidas probióticas, aprovechando su capacidad para estimular el crecimiento de bacterias benéficas (Paredes, 2024).

Por su parte, la cascarilla de cacao y café es una fuente rica en fibra dietética y compuestos fenólicos. Investigaciones recientes han evidenciado su uso en infusiones funcionales y harinas enriquecidas, con rendimientos cercanos al 90%, aportando antioxidantes y mejorando la calidad nutricional de productos de panificación (Ramos, 2023; Torres, 2022). La tabla 12 detalla los productos obtenidos.

Tabla 12. Aprovechamiento de residuos del café y cacao.

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Pectina (mucílago de cacao)	Extracción ácido-alcohol	18–22 %	Precipitación con etanol	Colombia	García, 2023
Biopelícula (mucílago de café)	Extracción + moldeo	70 %	Secado y prensado	Colombia	López, 2023
Bebida probiótica (mucílago)	Fermentación láctica	85 %	Inoculación con <i>Lactobacillus</i>	Perú	Paredes, 2024
Infusión funcional (cascarilla)	Secado y molienda	90 %	Procesamiento físico	Perú	Ramos, 2023
Harina enriquecida (cascarilla)	Deshidratación y micronizado	75 %	Molino de impacto	Colombia	Torres, 2022

### 3.5. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA FRUTÍCOLA Y HORTÍCOLA

La valorización de residuos agroindustriales provenientes de frutas y hortalizas se ha convertido en una estrategia clave para la bioeconomía, impulsada por la necesidad de reducir el impacto ambiental y generar productos funcionales de alto valor agregado. Entre los compuestos más relevantes se encuentran los polifenoles, presentes en cáscaras de granada, mango y cítricos, cuya extracción mediante tecnologías verdes ha mostrado resultados superiores frente a métodos convencionales, la tabla 13 presenta los productos resultantes.

Tabla 13. Aprovechamiento de residuos de frutas y hortalizas.

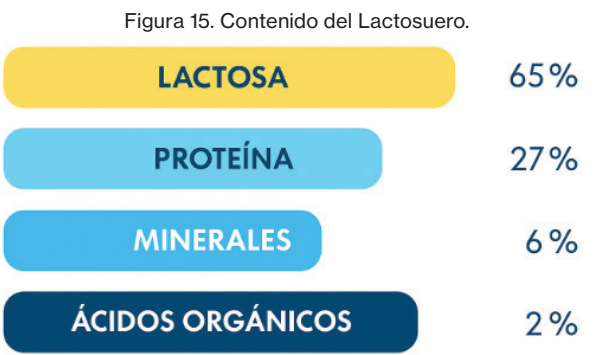
Producto / Residuo	Método de extracción	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Polifenoles – Cáscara de granada ( <i>Punica granatum</i> )	Maceración optimizada con solventes verdes	>10.4 veces vs. control	Extracción sólida-líquido con agitación controlada	México	Salinas-Flores et al., 2019
Polifenoles – Cáscara de mango ( <i>Mangifera indica</i> )	Extracción asistida por ultrasonido (UAE)	14.85–127.6 mg/g DW	Sonicación por sonda de alta intensidad	España	Aznar-Ramos et al., 2025

Producto / Residuo	Método de extracción	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Polifenoles – Cáscara de cítricos (naranja/ limón/mandarina)	Extracción asistida por microondas (MAE)	> rendimiento y < tiempo	Irradiación por microondas con control de presión y temperatura	Argentina	Enríquez et al., 2019
Aceite esencial – Cáscara de <i>Citrus jambhiri</i>	Destilación por arrastre de vapor	0.72 %	Sistema de destilación con condensador de reflujo	Perú	Salazar et al., 2023
Aceite vegetal – Semillas de uva ( <i>Vitis vinifera</i> )	Extracción asistida por ultrasonido + etanol	402–804 µg/g	Baño ultrasónico + rotavapor	Perú	Surco-Laos et al., 2020
Aceites vegetales – Semillas tropicales (varias especies)	Extracción con CO <sub>2</sub> supercrítico (SFE)	18–22 %	Sistema de extracción supercrítica con control de presión	Colombia	García et al., 2023
Extracto fenólico – Residuos mixtos (hortofrutícolas)	UAE + encapsulación	Alta recuperación	Ultrasonido de alta potencia + secado por aspersión	Colombia	Díaz et al., 2024
Polifenoles – Cáscara de papaya ( <i>Carica papaya</i> )	Extracción asistida por ultrasonido	65–70 %	Baño ultrasónico con solvente etanol/agua	Colombia	Rodríguez de Stouvenel et al., 2019
Polifenoles – Cáscara de piña ( <i>Ananas comosus</i> )	Fermentación en estado sólido	> concentración antioxidante	Bioproceso con <i>Aspergillus niger</i>	Colombia	Paz Arteaga et al., 2022
Polifenoles – Cáscara de banano ( <i>Musa paradisiaca</i> )	Extracción asistida por ultrasonido	37 % (maduro)	Baño ultrasónico con etanol	Ecuador	Seme Villacrés et al., 2025
Aceite – Semillas de maracuyá ( <i>Passiflora edulis</i> )	Extracción con solventes orgánicos	15–18 %	Prensado + extracción con éter etílico	Ecuador	Proaño et al., 2020
Polifenoles – Cáscara de naranja	Extracción asistida por ultrasonido	4074 mg GAE/100 g FW	Ultrasonido + etanol	Colombia	Vallejo Escobar et al., 2022
Polifenoles – Cáscara de limón	Extracción asistida por microondas	>157 % vs. convencional	Irradiación por microondas	España	Zapata et al., 2024

Producto / Residuo	Método de extracción	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Polifenoles – Cáscara de mandarina	Extracción asistida por ultrasonido	1426 mg CE/100 g FW	Ultrasonido + etanol	Colombia	Vallejo Escobar et al., 2022
Polifenoles – Cáscara de manzana ( <i>Malus domestica</i> )	Extracción con NADES + microondas	32.82 mg AG/L	Microondas con disolventes eutécticos	España	Notario Rodríguez et al., 2025
Polifenoles – Orujo de uva	Extracción asistida por ultrasonido	45.61 mg EAG/g PS	Ultrasonido + etanol	México	Bandera Rojas et al., 2024

### 3.6. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA LÁCTEA

La industria láctea genera una amplia variedad de residuos y subproductos que, si no son gestionados adecuadamente, pueden ocasionar impactos ambientales significativos. Entre estos residuos se encuentran los efluentes líquidos ricos en materia orgánica, grasas y proteínas (Figura 14), cuya descarga sin tratamiento contribuye a la contaminación de cuerpos de agua y al incremento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Diversos estudios han abordado esta problemática desde perspectivas tecnológicas y de sostenibilidad.



El suero de queso, subproducto líquido generado durante la coagulación de la leche en la elaboración de quesos, representa uno de los residuos más abundantes en la industria láctea. Tradicionalmente considerado un desecho, su disposición inadecuada puede ocasionar

problemas ambientales debido a su alta carga orgánica, contenido de lactosa, proteínas solubles y minerales, lo que incrementa la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en cuerpos de agua. Sin embargo, en el marco de la economía circular y la gestión integral de residuos agroindustriales, este subproducto ha adquirido relevancia como materia prima para la obtención de productos de valor agregado.

Entre las principales aplicaciones del suero de queso se destacan:

### 3.6.1. PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS FUNCIONALES Y BEBIDAS FERMENTADAS

El suero se emplea como base para bebidas lácteas, yogures y productos probióticos, aprovechando su contenido proteico y mineral, la tabla 14 detalla su utilización.

Tabla 14. Aprovechamiento de residuos de suero en bebidas.

Producto	Método de aprovechamiento	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Bebida láctea fermentada con pulpa de maracuyá	Fermentación láctica del suero con adición de fruta	85–90 % del suero utilizado	Fermentación controlada y pasteurización	Venezuela	Martínez Rodríguez et al., 2013
Pan enriquecido con concentrado proteico de suero	Sustitución parcial de harina por concentrado proteico	Incremento proteico del 10–15 %	Secado por atomización y ultrafiltración	Argentina	Visentín et al., 2009
Péptidos bioactivos a partir de lactosuero	Hidrólisis enzimática de proteínas del suero	70–80 % de recuperación proteica	Ultrafiltración e hidrólisis enzimática	Venezuela	Alvarado y Guerra, 2010
Bebidas funcionales y suplementos proteicos	Concentración y secado del suero para formulaciones líquidas y en polvo	90 % de aprovechamiento del suero	Filtración tangencial y secado por aspersión	Colombia	Bernal Aldana, 2022
Productos innovadores (bebidas, postres, suplementos)	Fermentación y mezcla con ingredientes funcionales	Variable (60–90 %)	Fermentación, pasteurización y homogeneización	El Salvador	Jacobo Marroquín y García Barrera, 2024



Producto	Método de aprovechamiento	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Innovación gastronómica con suero de leche	Desarrollo de recetas funcionales y evaluación sensorial	No especificado	Procesamiento térmico y estabilización	México	Vela-Gutiérrez, 2020

### 3.6.2. OBTENCIÓN DE PROTEÍNAS Y PÉPTIDOS BIOACTIVOS

A través de procesos de ultrafiltración y secado, se producen concentrados proteicos utilizados en la industria alimentaria y deportiva, la tabla 15 detalla su utilización.

Tabla 15. Aprovechamiento de residuos de suero en obtención de proteínas y péptidos.

Compuesto / Producto	Método de aprovechamiento	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Hidrolizado proteico con actividad antioxidante	Hidrólisis enzimática con Alcalase® aplicada sobre concentrado proteico de suero (WPC-80)	Grado de hidrólisis controlado mediante sistema pH-stato	Enzimas proteolíticas y cromatografía RP-HPLC	Argentina	López, 2019
Yogur bebible enriquecido con péptidos antihipertensivos	Hidrólisis enzimática con papaina seguida de ultrafiltración (≤10 kDa)	70 % de inhibición de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) en fracción ≤10 kDa	Fermentación láctica, ultrafiltración y separación por membranas	México	Vera, 2023
Ingrediente bioactivo para postres lácteos	Hidrólisis secuencial con Alcalase y Flavourzyme	Mejora significativa en la bioactividad antioxidante y antihipertensiva	Hidrólisis enzimática y caracterización funcional de péptidos	Argentina	Eberhardt, 2025
Péptidos antioxidantes derivados de lactosuero ácido	Precipitación térmica, tratamiento con sales, ultrafiltración y posterior hidrólisis enzimática	Rendimientos: PT 43 %, TS 28 %, UF 46 %	Ultrafiltración e hidrólisis con Alcalase, quimotripsina y Flavourzyme	Colombia	Zapata, 2020
Fraccionamiento de péptidos bioactivos	Hidrólisis enzimática con tripsina seguida de separación por membranas	No especificado (enriquecimiento de fracciones por peso molecular)	Ultrafiltración con membranas cargadas	España	Fernández, 2012

Compuesto / Producto	Método de aprovechamiento	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Proteínas del lactosuero (β-lactoglobulina, α-lactoalbúmina)	Separación por ultrafiltración y tecnologías combinadas	90 % de recuperación proteica	Ultrafiltración, microfiltración y nanofiltración	Colombia	Ramírez, 2018

### 3.6.3. SUSTRATO PARA BIOTECNOLOGÍA

Su alto contenido de lactosa lo convierte en un medio ideal para la fermentación microbiana, permitiendo la producción de ácido láctico, etanol, biogás y otros compuestos de interés industrial, en la tabla 16 se presenta la información.

Tabla 16. Aprovechamiento de residuos de suero en obtención de sustratos.

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
<b>Etanol (a partir de lactosa)</b>	Fermentación alcohólica extractiva con <i>Kluyveromyces marxianus</i>	53 g/L de etanol	Fermentación extractiva con ácido oleico como agente de separación	Argentina	Padin, 2009
<b>Biomasa microbiana (proteína unicelular)</b>	Fermentación continua con <i>Kluyveromyces marxianus</i>	4 kg/m <sup>3</sup> de biomasa; productividad de 0,79 kg/m <sup>3</sup> -h	Fermentación aerobia con control de pH y temperatura	Colombia	Buitrago, 2008
<b>Ácido láctico</b>	Fermentación con <i>Lactobacillus delbrueckii</i> y <i>Streptococcus thermophilus</i>	23,29 g/L de ácido láctico	Fermentación láctica con control de pH	Ecuador	Salazar, 2023
<b>Péptidos bioactivos</b>	Hidrólisis enzimática de proteínas del suero	70–80 % de recuperación proteica	Enzimas proteolíticas (Alcalase, Flavourzyme®) y ultrafiltración	Venezuela	Alvarado, 2010
<b>Biofertilizante y biogás</b>	Digestión anaerobia del lactosuero	65–75 % de conversión en metano	Biodigestión anaerobia con control térmico	Argentina	Schachenmayr, 2019
<b>Bioetanol 2G</b>	Fermentación de lactosa y polisacáridos hidrolizados	40–50 g/L de etanol	Pretratamiento enzimático y fermentación controlada	España	Caballero, 2014

### 3.6.4. ELABORACIÓN DE BIOPLÁSTICOS Y BIOFILMS

Investigaciones recientes exploran la incorporación de proteínas del suero en matrices poliméricas para desarrollar materiales biodegradables, en la tabla 17 se detalla la información.

Tabla 17. Aprovechamiento de residuos de suero en obtención de bioplásticos y biofilms.

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Biopelícula activa con antioxidantes ( $\alpha$ -tocoferol)	Mezcla de proteínas del suero con plastificante y adición de antioxidante	85–90 % del concentrado proteico aprovechado	Extrusión, secado por <i>casting</i> , ensayo mecánico según norma ASTM D882-01	Colombia	Granda-Restrepo, 2014
Película comestible a base de proteínas lácteas	Formación de film por <i>casting</i> utilizando glicerol como plastificante	80 % del suero transformado en matriz film	Técnica de <i>casting</i> y secado controlado	México	Zamudio, 2014
Biopelículas funcionales para recubrimiento de alimentos	Incorporación de proteínas del suero en una matriz polimérica funcional	75–85 % de aprovechamiento proteico	Fermentación, mezclado homogéneo y secado	Colombia	Cepeda-Tovar, 2022
Bioempaquetado biodegradable con péptidos encapsulados	Encapsulación de péptidos en polímeros biodegradables derivados del suero	70 % de recuperación de péptidos	Hidrólisis enzimática y encapsulación polimérica	México	Alvarado, 2017
Biopolímeros sostenibles para envases alimentarios	Concentración proteica y mezclado con aditivos funcionales	90 % de recuperación proteica	Ultrafiltración, secado y moldeo térmico	Colombia	Rodríguez, 2023

### 3.6.5. APLICACIONES AGRÍCOLAS

El suero puede ser transformado en fertilizantes líquidos o enmiendas orgánicas tras procesos de compostaje, en la tabla 18 se detalla la información.

Tabla 18. Aprovechamiento de residuos de suero en obtención de fertilizantes agrícolas.

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Biofertilizante líquido acelerado	Fermentación homoláctica con bacterias lácticas y melaza	pH final: 4.0; ácidos orgánicos: 2.85 g/L	Fermentación controlada en biorreactor artesanal	Perú	Reynoso, 2022
Biofertilizante foliar para brócoli	Fermentación del suero con bacterias ácido-lácticas y aplicación foliar	Incremento del rendimiento: 7 %; aumento del diámetro de floretes: +29 %	Fermentación láctica y aplicación foliar	México	García, 2022
Biofertilizante y bioestimulante agronómico	Conversión fermentativa con bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BAL)	Composición: ácido láctico + hidrolizados proteicos	Fermentación enzimática bajo principios de economía circular	España	Caballero, 2024
Fertilizante biodegradable	Biofermentación láctica en biodigestor artesanal	N: 0.57 %; P: 0.59 %; K: 0.43 %	Fermentación anaerobia con diseño de proceso industrial	Ecuador	Barrera, 2017
Lactofermentos agrícolas	Fermentación con bacterias lácticas y levaduras	pH: 4.0–4.3; reducción de fitotoxidad: 18 %	Fermentación en consorcio microbiano mixto	México	Benítez, 2017
Biofertilizante sólido (estruvita)	Co-digestión anaerobia del suero con estiércol	Producción simultánea de biogás y estruvita	Digestión anaerobia optimizada para recuperación de nutrientes	Colombia	Jaimes, 2018
Compostaje enriquecido	Mezcla de suero lácteo con residuos vegetales y estiércol	Reducción del tiempo de compostaje: 25 %	Compostaje aeróbico acelerado	Ecuador	Torres, 2019
Ensilaje mejorado	Adición de suero lácteo al forraje para mejorar la fermentación	Incremento del ácido láctico: 30 %; pH estable	Ensilaje anaerobio con bacterias lácticas	Argentina	Fernández, 2020

### 3.7. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA CÁRNICA

La industria cárnica genera una cantidad considerable de subproductos y residuos orgánicos, tales como sangre, vísceras, huesos, plumas, grasas y lodos, que representan un desafío ambiental y económico si no se gestionan adecuadamente. Sin embargo, estos materiales poseen un alto potencial de valorización por su contenido en proteínas, lípidos, minerales y compuestos bioactivos. El aprovechamiento integral de dichos residuos mediante tecnologías biotecnológicas, fisicoquímicas y termoquímicas ha permitido transformar los desechos en productos de alto valor agregado, como biogás, biofertilizantes, biodiésel, colágeno, gelatina, aminoácidos y péptidos funcionales (Villegas, 2011).

Este enfoque se alinea con los principios de la economía circular y la sostenibilidad industrial, promoviendo la reducción del impacto ambiental y la generación de nuevas oportunidades en sectores como la agricultura, la bioenergía y la industria alimentaria (Márquez, 2008). A través de estrategias como la digestión anaerobia, la hidrólisis enzimática, el compostaje y la transesterificación, diversos países han desarrollado procesos eficientes que incrementan la recuperación de nutrientes y energía a partir de los residuos cárnicos, contribuyendo así a una gestión más responsable y sostenible de los recursos, en la tabla 19 se detalla la información.

Tabla 19. Aprovechamiento de residuos de la industria cárnica.

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Sangre bovina	Digestión anaerobia para producción de biogás y biofertilizantes	Conversión de CH <sub>4</sub> : 65–70 %	Biodigestión anaerobia con control de temperatura	Colombia	Villegas, 2011
Plasma bovino	Incorporación en productos cárnicos reestructurados como aglutinante	Mejora la cohesión y reduce el desperdicio	Tecnología de emulsión y mezclado	México	Márquez, 2008

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Residuos sólidos (vísceras, grasa)	Producción de compost orgánico mediante mezcla con residuos vegetales	Reducción del tiempo de compostaje: 30 %	Compostaje aeróbico acelerado	España	China, 2021
Subproductos cárnicos (huesos, grasa)	Producción de biodiésel a partir de grasas animales	Rendimiento de conversión: 85 %	Transesterificación catalítica	Argentina	Fernández, 2019
Lodos y aguas residuales cárnicas	Tratamiento biológico para obtención de biofertilizantes líquidos	NPK: 0.5–0.8 %	Fermentación controlada y separación sólido-líquido	Ecuador	Hernández, 2022
Residuos proteicos	Producción de aminoácidos y péptidos mediante hidrólisis enzimática	Recuperación proteica: 70–80 %	Hidrólisis enzimática y ultrafiltración	España	Caballero, 2024
Plumas de aves	Hidrolización para obtención de queratina hidrolizada (fertilizante y alimento animal)	Conversión proteica: 65–75 %	Hidrólisis alcalina o enzimática	Brasil	Silva, 2020
Huesos y cartílagos	Producción de gelatina y colágeno para la industria alimentaria y agrícola	Rendimiento en gelatina: 20–25 %	Extracción térmica y enzimática	México	Torres, 2018
Cartílagos y tendones	Obtención de biofertilizantes ricos en nitrógeno mediante compostaje	Mejora del contenido NPK: 15 %	Compostaje aeróbico con inoculantes microbianos	España	López, 2021

### 3.8. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE GRASAS Y ACEITES

El aprovechamiento de residuos oleaginosos y subproductos grasos provenientes de la industria agroalimentaria representa una estrategia clave dentro del modelo de economía circular y sostenibilidad ambiental (Hernández, 2006). Estos residuos, que incluyen aceites usados, grasas animales, cascarillas de palma y aceites residuales de procesamiento, constituyen una fuente significativa de materia orgánica con alto valor energético y químico. Su correcta valorización permite reducir la contaminación ambiental, minimizar el impacto de vertidos en aguas y suelos, y generar productos de alto valor agregado como biocombustibles, biogás, biofertilizantes, biopolímeros y jabones biodegradables, la información se detalla en la tabla 20.

Tabla 20. Aprovechamiento de residuos de grasas y aceites.

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Subproductos de palma (cascarilla y fibra)	Compostaje con estiércol bovino para lombricultura	Mejor mezcla: 60% fibra + 40% estiércol	Compostaje aeróbico acelerado	Venezuela	Hernández, 2006
Aceites residuales de cocina	Producción de biodiésel mediante transesterificación	20,8–43,7% de conversión	Transesterificación catalítica	Venezuela	Marcano, 2014
Aceite de almendra	Extracción por arrastre con vapor y n-hexano	Rendimiento máximo: 49,05%	Extracción con solventes y vapor	Venezuela	Arveláez, 2008
Aceite de fusel (desecho agroindustrial)	Síntesis de acetato de n-butilo mediante destilación reactiva	Pureza: 99%	Destilación reactiva	Italia	Altomare, 2012
Residuos oleosos de aceites vegetales usados	Digestión anaerobia en dos fases con purín porcino	Eliminación DQO: 86,4%; biogás: 0,65 m <sup>3</sup> /kg SV (65% CH <sub>4</sub> )	Biodigestión anaerobia en dos fases	España	Hidalgo-Barrio, 2014
Aceite de oliva (residuos)	Análisis de ciclo de vida y economía circular	No especificado	ACV, procesos de valorización integral	España	Fernández Lobato, 2022

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Aceite vegetal usado	Producción de jabones, biocombustibles y lubricantes	No especificado	Transesterificación, saponificación	Colombia	Ojeda Arias, 2021
Aceite usado en Bogotá	Transformación en materia prima oleoquímica	No especificado	ACV, procesos oleoquímicos	Colombia	Torres Ulloa, 2019
Residuos agroalimentarios y aceites	Digestión anaerobia y co-digestión con purines	Biogás: hasta 0,65 m <sup>3</sup> /kg SV	Biodigestión anaerobia optimizada	España	Martín-Marroquín, 2018
Aceite reciclado y grasa de pollo	Producción de biodiésel mediante transesterificación	Rendimiento: 85% de conversión	Transesterificación catalítica	Perú	Huamani Córdova, 2023
Residuos oleosos (visión general)	Transformación en biocombustibles, biofertilizantes y biopolímeros	Variable según proceso	Tecnologías integradas (digestión, transesterificación, compostaje)	Global	González Salcedo, 2021
Residuos de aceites y grasas	Producción de biodiésel, bioetanol y biogás	Variable según materia prima	Procesos termoquímicos y biológicos	Global	Grande Tovar, 2020

### 3.9 RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE CEREALES Y OLEAGINOSAS

El aprovechamiento de subproductos agrícolas y agroindustriales provenientes de cereales y leguminosas representa una estrategia clave dentro del enfoque de economía circular aplicada al sector alimentario. Estos residuos, tradicionalmente considerados desechos, poseen un alto potencial para ser revalorizados mediante procesos biotecnológicos, fisicoquímicos y de transformación industrial, permitiendo generar productos con valor agregado y reduciendo el impacto ambiental de las actividades productivas.

En la actualidad, la investigación agroindustrial ha avanzado en la optimización de métodos para convertir materiales como la cascarilla de arroz, paja de cereales, bagazo o rastrojos de maíz en insumos útiles para la producción de biopolímeros, compost, bioempaques y alimentos funcionales. Las tecnologías empleadas, que incluyen la extrusión,



fermentación en estado sólido, biorrefinería y compostaje controlado, permiten recuperar componentes valiosos como proteínas, celulosa, hemicelulosa y lignina con altos porcentajes de rendimiento y eficiencia técnica, la tabla 21 detalla la información.

Tabla 21. Aprovechamiento de residuos de cereales y oleaginosas.

Compuesto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Cascarilla de arroz	Compostaje y vermicompostaje con bagazo de cerveza	Mejora la estabilidad y madurez del compost	Compostaje aeróbico y vermicompostaje	España	Palenzuela, 2024
Paja de cereales (trigo, cebada)	Biorrefinería para obtención de celulosa, hemicelulosa y lignina	Rendimiento de celulosa: 40–50%	Autohidrólisis, pasteado semiquímico, separación fraccionada	España	Vargas, 2017
Germen desgrasado de maíz	Incorporación en pasta alimenticia	Sustitución hasta 30% en formulación	Extrusión, secado industrial	Venezuela	Torres, 2009
Harinas de maíz y frijol lima	Extrusión para mejorar biodisponibilidad proteica	Digestibilidad proteica: 82%	Extrusión a 160 °C, 100 rpm	México	Pérez-Navarrete, 2007
Rastrojo de maíz	Producción de biopolímeros y envases biodegradables	No especificado	Procesos termoquímicos y biotecnológicos	Chile	Soto Velásquez, 2024
Subproductos de cereales (bagazo)	Fermentación en estado sólido para enzimas y proteína unicelular	Conversión proteica: 65–75%	Fermentación en sustrato sólido	Colombia	Granito, 2010

### 3.10. RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE PECES Y MARISCOS

La industria pesquera y marina genera una gran cantidad de subproductos y residuos orgánicos que, históricamente, han sido considerados desechos de bajo valor. Sin embargo, en las últimas décadas, el desarrollo de tecnologías biotecnológicas y de procesos sostenibles ha permitido su valorización mediante la obtención de compuestos de alto

valor agregado. Estos incluyen proteínas hidrolizadas, péptidos bioactivos, gelatina, colágeno, quitosano, polisacáridos, pigmentos naturales y biocombustibles.

El aprovechamiento integral de estos residuos se enmarca dentro de los principios de la economía circular y la bioeconomía azul, promoviendo la reducción del impacto ambiental y la optimización de los recursos marinos. Procesos como la hidrólisis enzimática, la fermentación láctica, la digestión anaerobia, la transesterificación y la extracción con CO<sub>2</sub> supercrítico representan herramientas tecnológicas clave para la transformación sostenible de la biomasa marina, en la tabla 22 se detalla la información.

Tabla 22. Aprovechamiento de residuos de peces y mariscos.

Producto	Método	% Aprovechado	Tecnología empleada	País	Referencia
Desechos de pescado (cabezas, vísceras, espinas)	Hidrólisis enzimática para obtención de péptidos bioactivos	70–80% de recuperación proteica	Enzimas proteolíticas (Alcalase, Neutrase), ultrafiltración	España	Gómez, 2021
Colágeno y gelatina (piel y cartílagos)	Extracción térmica y enzimática	Rendimiento: 20–25% en gelatina	Hidrólisis controlada, secado por atomización	México	Torres, 2020
Aceites marinos (hígado de atún y sardina)	Transesterificación para biodiésel y microencapsulación para nutraceuticos	Conversión: 85–90%	Transesterificación catalítica, <i>spray drying</i>	Brasil	Silva, 2019
Aguas residuales de procesamiento	Digestión anaerobia para biogás y recuperación de nutrientes	CH <sub>4</sub> : 65%; Eliminación DQO: 80%	Biodigestión anaerobia en dos fases	Chile	Hidalgo, 2018
Conchas y exoesqueletos (camarón, cangrejo)	Desacetilación para obtención de quitosano	Rendimiento: 60–70% de quitina	Fermentación láctica, tratamiento alcalino	Colombia	Martínez, 2022
Algas marinas ( <i>Ulva</i> , <i>Sargassum</i> )	Extracción de polisacáridos y pigmentos	Agar: 18–22%; Carragenanos: 25%	Extracción con CO <sub>2</sub> supercrítico, secado controlado	Perú	Fernández, 2023
Sedimentos marinos (biomasa microbiana)	Cultivo en biorreactores para obtención de enzimas termoestables	No especificado	Aislamiento y fermentación controlada	Japón	Nakamura, 2020

### 3.11. SÍNTESIS GLOBAL DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

El conjunto de datos recopilados en el capítulo muestra un panorama integral del aprovechamiento de residuos provenientes de ocho industrias agroalimentarias: azucarera, cacaotera-cafetera, frutícola-hortícola, láctea, cárnica, pesquera-marina, oleaginosa y cerealera. En total, se identifican más de 70 procesos tecnológicos y más de 100 productos con valor agregado, lo que evidencia una sólida base de innovación para la economía circular agroindustrial en América Latina. Desde una perspectiva cuantitativa, los niveles de aprovechamiento promedio se agrupan de la siguiente manera, según la tabla 23.

Tabla 23. Promedios estimados de aprovechamiento de residuos agroindustriales por sector en América Latina.

Industria	Rango de aprovechamiento (%)	*Promedio estimado (%)	Procesos de transformación de residuos
Azucarera (bagazo, cachaza, vinaza)	45–90	74.0	Fermentación, compostaje, pirólisis
Cacaotera y cafetera	18–90	67.5	Fermentación, secado, extracción ácido-alcohólica
Frutícola y hortícola	0.7–127 (según unidad)	60.0	Extracción asistida (UAE, MAE), destilación, maceración
Láctea	40–90	78.5	Fermentación, ultrafiltración, hidrólisis enzimática
Cárnica	20–85	70.0	Digestión anaerobia, transesterificación, compostaje
Pesquera y marina	20–90	71.5	Hidrólisis enzimática, desacetilación, digestión anaerobia
Oleaginosa y grasas	20–86	68.0	Transesterificación, compostaje, digestión anaerobia
Cerealera y leguminosa	40–82	65.0	Extrusión, fermentación en estado sólido, compostaje

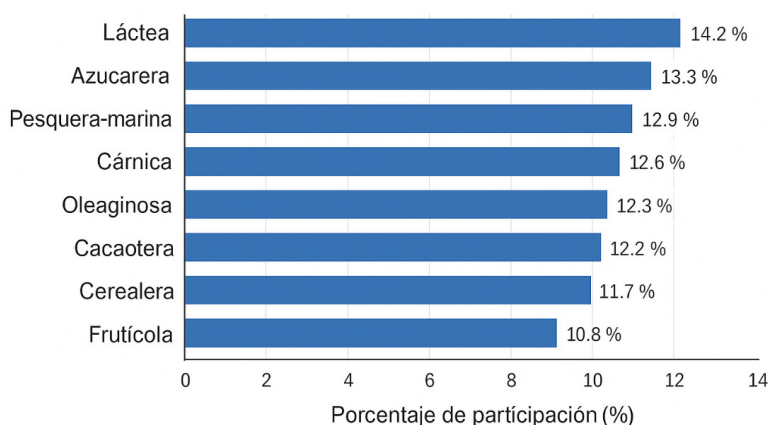
\*Para calcular el promedio estimado se aplicó la siguiente ecuación:

$$Promedio\ estimado = \frac{\% \text{ Individuales}}{\% \text{ evaluados}} \quad Ec.1$$

El análisis comparativo de los datos recopilados en este capítulo permitió construir una visión integradora del aprovechamiento de residuos agroindustriales en ocho sectores productivos estratégicos de América Latina: azucarera, cacaotera-cafetera, frutícola-hortícola, láctea, cárnica, pesquera-marina, oleaginosa y cerealera. Cada una de estas industrias genera grandes volúmenes de subproductos orgánicos que, históricamente, eran considerados desechos o pasivos ambientales. Sin embargo, el desarrollo de procesos biotecnológicos, fisicoquímicos y termoquímicos ha transformado este panorama, permitiendo que dichos residuos se conviertan en materias primas secundarias con alto valor agregado.

A partir de la información sistematizada en las tablas precedentes que detallan los métodos de procesamiento, porcentajes de aprovechamiento y tecnologías empleadas, se elaboró un análisis estadístico de síntesis, cuyo propósito fue identificar el peso relativo de cada sector dentro del aprovechamiento total de residuos agroindustriales. Para ello, los valores de rendimiento promedio de cada industria fueron normalizados al 100 % global, de modo que cada porcentaje refleje su contribución proporcional al total de la capacidad de valorización observada en el conjunto de datos, según se detalla en la figura 15.

Figura 16. Distribución del aprovechamiento de residuos.



## 3.12. PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS

### 3.12.1. FERMENTACIÓN

La fermentación es un proceso biotecnológico fundamental para la valorización de residuos agroindustriales, basado en la acción metabólica de microorganismos que transforman compuestos orgánicos en productos de alto valor agregado. Este mecanismo ocurre en condiciones controladas de temperatura, pH y oxígeno, dependiendo del tipo de fermentación (láctica, alcohólica, acética, entre otras). En la industria azucarera, el bagazo y la vinaza se emplean como sustratos para producir bioetanol, ácido láctico y proteínas unicelulares, aprovechando su alto contenido de carbohidratos y nutrientes. De igual manera, en la industria láctea, el lactosuero se convierte en biomasa microbiana y metabolitos funcionales mediante fermentación, reduciendo su impacto ambiental y generando insumos para alimentos y bioplásticos. Este proceso también se aplica en residuos cárnicos y pesqueros para obtener compuestos bioactivos y biogás, contribuyendo a la economía circular. Las ventajas incluyen la reducción de la carga contaminante, la generación de productos sostenibles y la posibilidad de integrar tecnologías como fermentación en estado sólido para optimizar la conversión de residuos lignocelulósicos. Sin embargo, presenta limitaciones como la necesidad de pretratamientos para mejorar la biodisponibilidad de los sustratos y la gestión de efluentes. En términos de sostenibilidad, la fermentación se considera una estrategia clave para cerrar ciclos productivos, disminuir emisiones y diversificar la matriz energética mediante biocombustibles. Su implementación requiere un enfoque integral que combine ingeniería de procesos, selección de cepas y control automatizado, lo que se alinea con los principios de la bioeconomía y la normativa europea sobre residuos (Caballero, 2014).

### 3.12.2. COMPOSTAJE

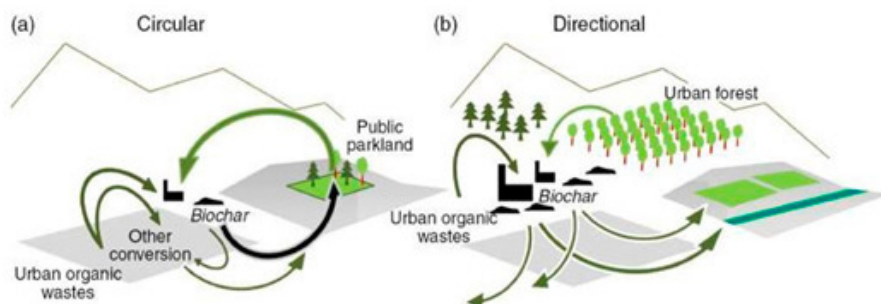
Proceso biológico aeróbico que transforma residuos orgánicos en abono estable mediante la acción de microorganismos descomponedores.

Este mecanismo se basa en la oxidación de la materia orgánica, liberando calor y reduciendo el volumen inicial del residuo. En la agroindustria, se aplica ampliamente para la valorización de subproductos como cachaza, bagazo, cáscaras de frutas, estiércoles y restos vegetales, convirtiéndolos en compost rico en nutrientes y materia orgánica. El proceso se desarrolla en fases: mesófila, termófila y maduración, donde se eliminan patógenos y semillas indeseadas, garantizando la inocuidad del producto final. Entre sus ventajas destacan la reducción de residuos enviados a vertederos, la mejora de la fertilidad del suelo y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero frente a la disposición convencional (FAO,2013)).

### 3.12.3. PIROLISIS

Proceso termoquímico que descompone materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando productos como biochar, bioaceite y gases combustibles. Este mecanismo se realiza a temperaturas que oscilan entre 300 °C y 700 °C, dependiendo del tipo de pirólisis (rápida, lenta o flash), y es especialmente útil para residuos lignocelulósicos como bagazo de caña, cáscaras de café y restos oleaginosos. El biochar obtenido se emplea como enmienda agrícola para mejorar la retención de agua y nutrientes en el suelo, mientras que el bioaceite puede refinarse para producir combustibles líquidos y compuestos químicos de interés industrial, según se detalla en la figura 17.

Figura 17. Proceso del biochar.



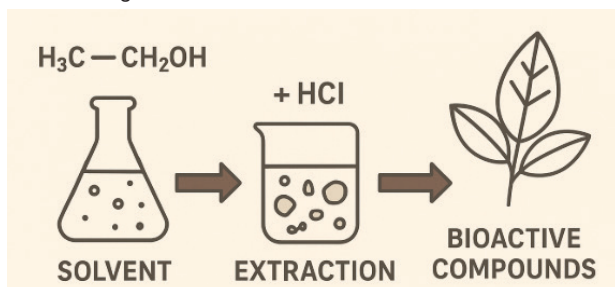
### 3.12.4. SECADO

Proceso físico fundamental para la estabilización y conservación de residuos agroindustriales, basado en la eliminación parcial o total del agua presente en la matriz orgánica mediante transferencia de calor y masa. Este mecanismo reduce la actividad microbiana y enzimática, prolongando la vida útil del material y facilitando su posterior transformación en productos de valor agregado. En la industria cacaotera y cafetera, el secado se aplica para estabilizar cáscaras, mucílagos y pulpas, evitando fermentaciones indeseadas y permitiendo su uso en la obtención de compuestos bioactivos como polifenoles y fibras dietéticas. Existen diversas tecnologías de secado, entre ellas el secado solar, por aire caliente, liofilización y secado por atomización, cada una con ventajas y limitaciones en términos de eficiencia energética, costo y preservación de compuestos funcionales (García, 2023).

### 3.12.5. EXTRACCIÓN ACIDO LÁCTICA ALCOHÓLICA

Método químico ampliamente utilizado para recuperar compuestos bioactivos presentes en residuos agroindustriales, especialmente polifenoles, flavonoides y alcaloides. Este proceso se basa en la solubilización de metabolitos en mezclas de alcohol (*etanol*, *metanol*) y soluciones ácidas (*ácido cítrico*, *clorhídrico*), lo que permite romper enlaces y liberar compuestos de la matriz vegetal. En la industria cacaotera y cafetera, esta técnica se emplea para obtener antioxidantes naturales a partir de cáscaras y mucílagos, aprovechando su potencial funcional en alimentos, nutracéuticos y cosméticos. La eficiencia del proceso depende de factores como la concentración del solvente, el pH, la temperatura y el tiempo de extracción, los cuales deben optimizarse para maximizar el rendimiento sin degradar los compuestos sensibles, según se detalla en la figura 18 (Aznar et al., 2025).

Figura 18. Reacción ácido láctico -alcohólica.



### 3.12.6. EXTRACCIÓN ASISTIDA (UAE, MAE)

Son tecnologías emergentes que optimizan la recuperación de compuestos bioactivos en residuos agroindustriales mediante la aplicación de energía no convencional. UAE utiliza ondas ultrasónicas para generar cavitación en el medio líquido, lo que rompe las paredes celulares y facilita la liberación de metabolitos como polifenoles, carotenoides y aceites esenciales. Por su parte, MAE emplea radiación electromagnética para calentar selectivamente el agua y los solventes dentro de la matriz vegetal, acelerando la extracción y reduciendo el tiempo de procesamiento. Estas técnicas se aplican en residuos frutícolas y hortícolas, como cáscaras y semillas, para obtener antioxidantes naturales, aceites funcionales y compuestos aromáticos con aplicaciones en alimentos, cosmética y farmacéutica. Entre sus ventajas destacan la reducción del consumo energético, la menor degradación térmica y la posibilidad de emplear solventes verdes como etanol y agua.

### 3.12.7. DESTILACIÓN

Proceso físico-químico que permite separar componentes volátiles presentes en mezclas líquidas mediante la aplicación de calor y la posterior condensación de vapores. En el contexto agroindustrial, se utiliza principalmente para la recuperación de aceites esenciales, alcoholes y compuestos aromáticos a partir de residuos frutícolas y hortícolas, como cáscaras, semillas y pulpas. Este método se basa en las diferencias en los



puntos de ebullición de los componentes, lo que permite obtener fracciones purificadas con alto valor comercial. Existen variantes como la destilación simple, fraccionada y por arrastre de vapor, siendo esta última la más empleada para extraer compuestos termolábiles sin degradarlos. Entre sus ventajas se encuentra la obtención de productos naturales con aplicaciones en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica, contribuyendo a la valorización de residuos y la reducción de desperdicios.

### 3.12.8. MACERACIÓN

Proceso de extracción sólido-líquido que consiste en sumergir materiales vegetales en un solvente durante un tiempo prolongado para liberar compuestos bioactivos. Este método, tradicionalmente utilizado en la industria alimentaria y farmacéutica, se aplica en la valorización de residuos frutícolas y hortícolas, como cáscaras y semillas, para obtener antioxidantes, pigmentos y aceites esenciales. La eficiencia del proceso depende de factores como el tipo de solvente (agua, etanol, mezclas hidroalcohólicas), la temperatura y el tiempo de contacto, los cuales deben optimizarse para evitar la degradación de compuestos sensibles. Entre sus ventajas se encuentra la simplicidad operativa y el bajo costo, lo que la convierte en una opción viable para pequeñas y medianas agroindustrias. Sin embargo, presenta limitaciones como el largo tiempo de extracción y el uso de grandes volúmenes de solvente, lo que puede generar impactos ambientales si no se gestionan adecuadamente. La maceración se complementa con tecnologías emergentes como ultrasonido y microondas para acelerar el proceso y mejorar el rendimiento, alineándose con los principios de sostenibilidad. Este método contribuye a la economía circular al transformar residuos en ingredientes funcionales para alimentos, cosméticos y nutracéuticos, reduciendo la generación de desechos y promoviendo la innovación en la cadena agroindustrial (Cañadas, 2022).

### 3.12.9. ULTRAFILTRACIÓN

Técnica de separación por membranas que permite concentrar y purificar macromoléculas presentes en soluciones líquidas mediante el uso de membranas semipermeables con poros de tamaño nanométrico. En la industria láctea, se aplica para la valorización del lactosuero, separando proteínas, péptidos y otros compuestos funcionales que pueden emplearse en la formulación de alimentos, suplementos y biopolímeros. Este proceso se basa en la presión diferencial que impulsa el paso del solvente y moléculas pequeñas a través de la membrana, reteniendo las fracciones de mayor tamaño. Entre sus ventajas destacan la alta selectividad, la preservación de compuestos sensibles y la posibilidad de integrar sistemas continuos para mejorar la eficiencia. Además, contribuye a la reducción de la carga contaminante del lactosuero, evitando su disposición inadecuada en cuerpos de agua. Es una tecnología clave en la economía circular, ya que permite transformar un residuo altamente contaminante en productos de alto valor agregado, reduciendo impactos ambientales y promoviendo la sostenibilidad en la industria láctea (Buitrago, 2008).

# CAPÍTULO 4

## GESTIÓN INTEGRAL Y POLÍTICAS PARA LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

### 4.1. GESTIÓN INTEGRAL

La agroindustria constituye uno de los pilares fundamentales para el desarrollo económico y social a nivel global, pero también es responsable de la generación de grandes volúmenes de residuos orgánicos y subproductos que, si no se gestionan adecuadamente, pueden ocasionar impactos ambientales significativos. Se estima que en América Latina y el Caribe se producen millones de toneladas de biomasa residual cada año, derivada principalmente de cultivos como caña de azúcar, arroz, maíz y café, así como de procesos agroalimentarios que generan bagazo, cascarilla, lactosuero y restos hortofrutícolas. El manejo ineficiente de estos residuos contribuye a problemas como la contaminación de suelos y cuerpos de agua, emisiones de gases de efecto invernadero y proliferación de vectores biológicos, lo que plantea la necesidad urgente de implementar estrategias sostenibles para su valorización y aprovechamiento (Rodríguez, 2023; Aguiar Novillo et al., 2022).

La gestión integral de residuos agroindustriales se enmarca en principios de economía circular y bioeconomía, orientados a cerrar ciclos de materia y energía mediante procesos que transformen los desechos en recursos de valor agregado. Entre las tecnologías más destacadas se encuentran la digestión anaeróbica para la producción de biogás, el compostaje para la obtención de biofertilizantes, la pirólisis y gasificación para generar bioenergía, así como la extracción de compuestos bioactivos con aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética.

Estas alternativas no solo reducen la carga contaminante, sino que también promueven la generación de productos como bioplásticos, materiales biodegradables y alimentos funcionales, contribuyendo a la sostenibilidad económica y ambiental del sector (Molina-Morejón et al., 2025; Cañadas Soler, 2022).

## 4.2. MARCO NORMATIVO DEL DEL ECUADOR

La gestión adecuada de los residuos agroindustriales se ha convertido en un eje fundamental para alcanzar los objetivos de sostenibilidad y desarrollo económico en Ecuador. En este contexto, el marco normativo nacional establece directrices claras que orientan la transición hacia modelos productivos más responsables y circulares. Normas como el Código Orgánico del Ambiente (COA) (Asamblea Nacional, 2017), la Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva (Asamblea Nacional, 2021), la Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria (LORSA) (Asamblea Nacional, 2009) y regulaciones técnicas específicas, reflejan el compromiso del Estado ecuatoriano con la protección ambiental y la optimización de recursos.

Estas disposiciones no solo regulan la gestión integral de residuos, sino que promueven su aprovechamiento como insumo para nuevos productos, fomentando prácticas como el compostaje, la producción de abonos orgánicos, la generación de energía y la elaboración de sustratos para la recuperación de suelos (Ministerio del Ambiente, 2020). Además, integran principios de economía circular, inclusión social y soberanía alimentaria, asegurando que los procesos productivos contribuyan a la reducción de impactos ambientales y al bienestar de las comunidades (Avina, 2021).

El COA, por ejemplo, establece obligaciones para los Gobiernos Autónomos Descentralizados en la incorporación del aprovechamiento de residuos orgánicos en sus planes de gestión (Asamblea Nacional, 2017), mientras que la Ley de Economía Circular Inclusiva impulsa la valorización de materiales y la innovación tecnológica (Asamblea Nacional, 2021).

Por su parte, la LORSA vincula la gestión de residuos con la producción agroecológica y la seguridad alimentaria, consolidando un enfoque integral que articula sostenibilidad, salud y desarrollo local (FAOLEX, 2009).

En conjunto, estas normativas constituyen un marco sólido para la implementación de proyectos que transformen los residuos agroindustriales en oportunidades productivas, contribuyendo a la mitigación del cambio climático, la reducción de la contaminación y la generación de empleo digno. Su aplicación efectiva representa un paso decisivo hacia la construcción de un modelo económico resiliente, inclusivo y alineado con los principios del *Buen Vivir* (Ministerio del Ambiente, 2022). A continuación, se detalla las normativas.

#### 4.2.1. LEY ORGÁNICA DE ECONOMÍA CIRCULAR INCLUSIVA – 2021

Aprobada en julio de 2021, esta ley marca un hito en América Latina al establecer un marco normativo para la transición de una economía lineal hacia una economía circular inclusiva. Su objetivo es implementar principios de ecodiseño, producción y consumo sostenibles, reducir la generación de residuos y fomentar su gestión integral e inclusiva (Carbono Neutral, 2022).

La ley reconoce la importancia de los recicladores de base como actores estratégicos en la cadena de valor, promoviendo su formalización y garantizando condiciones de trabajo digno, equidad de género y acceso seguro al material reciclable (Avina, 2021). Además, crea el Sistema Nacional de Economía Circular Inclusiva (SNECI), encargado de articular la implementación de la Estrategia Nacional de Economía Circular, incorporando metas de ecodiseño y mecanismos de actualización periódica (Ecuador Circular, 2021).

El Reglamento a la Ley (Decreto Ejecutivo 844, 2023) refuerza la rectoría del sistema, establece incentivos para la adopción de prácticas circulares y vincula la planificación institucional de los GAD con metas e indicadores de economía circular. Esta normativa es crucial para reducir impactos ambientales, generar empleo digno y fortalecer la competitividad empresarial mediante la innovación tecnológica y la responsabilidad social.

#### 4.2.2. CÓDIGO ORGÁNICO DEL AMBIENTE

El Código Orgánico del Ambiente, promulgado en 2017 y vigente desde 2018, constituye el marco jurídico más importante en materia ambiental en Ecuador. Su objetivo principal es garantizar el derecho de las personas a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, así como proteger los derechos de la naturaleza, en concordancia con la Constitución y el paradigma del *Buen Vivir* o *Sumak Kawsay* (Martínez, 2019). Este código unifica disposiciones que antes estaban dispersas, creando una estructura normativa coherente para la gestión ambiental, la conservación de la biodiversidad y la regulación de actividades productivas.

Los artículos 593 y 594 son fundamentales para la gestión de residuos orgánicos. El primero establece que los residuos generados en los cantones, incluyendo los provenientes de poda y limpieza de áreas verdes, deben ser aprovechados mediante alternativas adecuadas a la realidad local. Además, obliga a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) a incluir este componente en sus Planes de Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos, priorizando el reciclaje inclusivo. El artículo 594 complementa esta disposición al otorgar a la Autoridad Ambiental Nacional la facultad de establecer metas de recuperación y aprovechamiento de residuos orgánicos (COA, 2017).

Por su parte, el artículo 668 introduce la Estrategia Nacional de Producción y Consumo Sostenible, que busca minimizar la generación de desechos y fomentar el aprovechamiento de residuos en concordancia con la Política Ambiental Nacional. Este enfoque promueve proyectos que respalden la seguridad y soberanía alimentaria, integrando criterios de sostenibilidad en la planificación territorial y en la actividad productiva (COA, 2017).

La reforma al artículo 231 en 2021 refuerza la responsabilidad de los GAD en el manejo integral de residuos no peligrosos, incentivando la investigación y el desarrollo de tecnologías para su aprovechamiento (AV CORP, 2025). Además, el Reglamento al COA (Decreto Ejecutivo 752, 2019) establece procedimientos para prevenir daños ambientales y recuperar

espacios degradados, aplicables a proyectos de valorización de residuos (UNEP, 2019).

La importancia del COA radica en que no solo regula la gestión de residuos, sino que incorpora principios como el *quien contamina paga*, el desarrollo sostenible y el *in dubio pro natura*, fortaleciendo la responsabilidad objetiva por daños ambientales (Eco Jurisprudence Monitor, 2022). Esto lo convierte en una herramienta clave para la transición hacia modelos productivos sostenibles y la economía circular.

#### 4.2.3. LEY ORGÁNICA DEL RÉGIMEN DE LA SOBERANÍA ALIMENTARIA (LORSA)

Promulgada en 2009, la LORSA responde al mandato constitucional de garantizar la soberanía alimentaria como objetivo estratégico del Estado. El artículo 1 establece mecanismos para asegurar el acceso permanente a alimentos sanos, nutritivos y culturalmente apropiados, mientras que el artículo 14 promueve la producción agroecológica, orgánica y sustentable mediante incentivos, capacitación y líneas de crédito (FAOLEX, 2009).

Esta ley tiene un impacto directo en la gestión de residuos agroindustriales, ya que fomenta prácticas agrícolas sostenibles que pueden incorporar el aprovechamiento de residuos orgánicos como insumos para la producción. Además, articula políticas públicas orientadas a la seguridad alimentaria y la reducción de la dependencia de insumos externos, fortaleciendo la resiliencia de los sistemas agroalimentarios frente al cambio climático.

#### 4.2.4. NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL PARA EL MANEJO Y DISPOSICIÓN FINAL DE DESECHOS SÓLIDOS NO PELIGROSOS

Esta norma técnica, contenida en el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, establece criterios para el manejo integral de desechos sólidos no peligrosos, desde su generación hasta su disposición final (Decreto N° 3516, 2003). Regula aspectos como

almacenamiento, transporte, tratamiento y recuperación, con el objetivo de prevenir la contaminación del aire, agua y suelo. Su importancia radica en que proporciona lineamientos técnicos para garantizar la sostenibilidad de los sistemas de gestión de residuos, promoviendo prácticas como el compostaje y la valorización de la fracción orgánica, esenciales para la economía circular.

#### 4.2.5. ACUERDO MINISTERIAL NO. 177 (PRODUCCIÓN ORGÁNICA AGROPECUARIA)

Emitido en 2003, este acuerdo regula la producción, transformación y comercialización de productos orgánicos en Ecuador. Establece normas para garantizar la calidad, la certificación y la trazabilidad de los productos, así como la elaboración de planes de manejo orgánico que incluyan medidas de conservación del suelo, agua y biodiversidad (FAOLEX, 2003). Este marco normativo es relevante porque promueve prácticas agroecológicas que pueden integrar el uso de residuos agroindustriales como insumos, contribuyendo a la sostenibilidad y a la reducción de impactos ambientales.

#### 4.2.6. ORDENANZAS MUNICIPALES Y MANUALES TÉCNICOS

El Manual de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos (AME, 2020) ofrece lineamientos para la producción de abonos, energía y proyectos productivos a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos. Además, las ordenanzas locales regulan la separación en la fuente y la valorización de orgánicos, fortaleciendo la gestión integral a nivel municipal (Ministerio del Ambiente, 2020). La tabla 24 presenta una relación de las normativas.



<b>Normativa</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Relación con el Manejo de Residuos Agroindustriales</b>	<b>Aplicaciones Prácticas</b>	<b>Fuente</b>
Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva (2021)	Promover la transición de una economía lineal a una circular e inclusiva.	Fomenta la valorización de residuos orgánicos e inorgánicos mediante el ecodiseño, reciclaje, y reincorporación de materiales a nuevos ciclos productivos.	Creación de biofertilizantes, biogás, bioplásticos y compostaje industrial con residuos agroindustriales.	Asamblea Nacional / Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE)
Código Orgánico del Ambiente (COA, 2017)	Garantizar un ambiente sano y regular la gestión ambiental en el país.	Establece la obligación de los GAD de incluir el aprovechamiento de residuos orgánicos en sus planes de gestión. Promueve la producción y consumo sostenible.	Implementación de plantas de compostaje, biodigestores y sistemas de separación en fuente en industrias agroalimentarias.	Asamblea Nacional / MAATE
Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria (LORSA, 2009)	Asegurar la soberanía y seguridad alimentaria mediante producción sostenible.	Vincula la gestión de residuos con la producción agroecológica, impulsando el uso de desechos orgánicos como abono o materia prima.	Reutilización de subproductos agrícolas y pecuarios en la producción de bioinsumos y compost.	Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) / FAOLEX
Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de Desechos Sólidos No Peligrosos (2003)	Regular el manejo, transporte, tratamiento y disposición final de residuos.	Define parámetros técnicos para el tratamiento de residuos agroindustriales no peligrosos.	Control de lixiviados, manejo adecuado de residuos orgánicos y creación de rellenos sanitarios técnicos.	Ministerio del Ambiente (MAE) / Decreto N.º 3516
Acuerdo Ministerial No. 177 (Producción Orgánica Agropecuaria, 2003)	Regular la producción orgánica y promover prácticas sostenibles.	Promueve el uso de residuos agroindustriales como insumo orgánico bajo esquemas certificados.	Empleo de residuos de frutas, vegetales y estiércol en fertilización orgánica.	Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) / FAOLEX

Normativa	Objetivo	Relación con el Manejo de Residuos Agroindustriales	Aplicaciones Prácticas	Fuente
Ordenanzas Municipales y Manuales Técnicos (AME, 2020)	Establecer lineamientos locales para el aprovechamiento de residuos.	Regulan la separación en la fuente y la valorización orgánica a nivel cantonal y provincial.	Implementación de centros de compostaje, lombricultura y plantas piloto de biogás con residuos agroindustriales.	Asociación de Municipalidades Ecuatorianas (AME) / MAATE
Reglamento al COA (Decreto Ejecutivo 752, 2019)	Detallar los procedimientos para prevenir y reparar daños ambientales.	Regula la recuperación de espacios degradados por residuos y fomenta tecnologías limpias.	Aplicación de procesos de bioremediación y tecnologías de valorización energética.	Presidencia de la República / MAATE
Decreto Ejecutivo 844 (Reglamento a la Ley de Economía Circular, 2023)	Operativizar la aplicación de la Ley de Economía Circular Inclusiva.	Establece incentivos y metas obligatorias para la gestión de residuos en sectores productivos.	Vinculación de empresas agroindustriales a cadenas circulares y programas de innovación verde.	Secretaría Técnica de Economía Circular / MAATE

## 4.3. MARCO NORMATIVO INTERNACIONAL

### 4.3.1. NORMATIVAS EN ESTADOS UNIDOS

La *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA), promulgada en 1976, constituye uno de los pilares fundamentales del derecho ambiental en Estados Unidos, al establecer un marco regulatorio integral para la gestión de residuos sólidos y peligrosos. Su objetivo principal es garantizar la protección de la salud humana y del medio ambiente mediante la regulación del ciclo completo de los residuos, desde su generación hasta su disposición final, bajo el principio “cradle to grave” (de la cuna a la tumba) (AcademiaLab, 2025). Este enfoque implica que cada etapa del manejo de residuos debe cumplir con estándares técnicos y legales que aseguren la trazabilidad y minimicen los riesgos asociados a la contaminación. La RCRA se estructura en varios subtítulos, siendo los más relevantes para la agroindustria el Subtítulo C, que regula los residuos peligrosos,

y el Subtítulo D, que establece disposiciones para residuos sólidos no peligrosos. El primero impone requisitos estrictos para la identificación, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición de residuos peligrosos, obligando a las instalaciones a obtener permisos específicos y cumplir con normas técnicas rigurosas (EPA, 2023). El segundo, aunque menos restrictivo, establece lineamientos para la disposición segura de residuos sólidos municipales e industriales, incluyendo rellenos sanitarios, con el fin de prevenir la contaminación del suelo y las aguas subterráneas (Tecnología Ambiental, 2024).

En el ámbito agroindustrial, la aplicación de la RCRA es particularmente relevante debido a la diversidad de residuos generados, que incluyen tanto materiales peligrosos como no peligrosos. Las plantas procesadoras deben implementar sistemas de almacenamiento seguro, etiquetado y transporte conforme a las normas federales, además de obtener permisos TSDF (Treatment, Storage and Disposal Facilities) para las instalaciones que realizan tratamiento o disposición final. Asimismo, la normativa exige la preparación de planes de contingencia y la capacitación del personal para responder ante emergencias, lo que refuerza la responsabilidad operativa y legal de las empresas (OSHA Outreach Courses, 2025). La implementación de la RCRA se materializa a través del Título 40 del Código de Regulaciones Federales (CFR), específicamente en las Partes 239-282, que contienen los estándares técnicos para la construcción y operación de instalaciones, monitoreo ambiental y procedimientos de cierre. Cabe destacar que los estados pueden administrar programas equivalentes, siempre que sean igual o más estrictos que los federales, lo que otorga flexibilidad normativa sin comprometer la protección ambiental (EPA, 2025). A lo largo del tiempo, la RCRA ha sido objeto de modificaciones significativas, como las Enmiendas sobre Eliminación de Residuos Sólidos y Peligrosos (HSWA) de 1984, que fortalecieron los requisitos para la acción correctiva en sitios contaminados, y la Ley Federal de Cumplimiento de Instalaciones (FFCO) de 1992, que extendió la responsabilidad a instalaciones federales (EnvNM, 2025).

#### 4.3.1.1. Clean Water Act (CWA)

Aprobada en 1972, constituye el marco legal que regula la calidad de las aguas superficiales en Estados Unidos, con el objetivo de “restaurar y mantener la integridad química, física y biológica de las aguas de la nación” (NRDC, 2025). Esta ley establece un sistema normativo robusto que incluye el NPDES (National Pollutant Discharge Elimination System), el cual obliga a obtener permisos para cualquier descarga de contaminantes en aguas superficiales. Las instalaciones agroindustriales que vierten aguas residuales deben cumplir con límites específicos de contaminantes, lo que implica la adopción de tecnologías de tratamiento y monitoreo continuo (EPA, 2025). Además, la CWA contempla la fijación de estándares de calidad del agua, definidos por los estados en función de los usos designados, como consumo humano, recreación y protección de la vida acuática. Otro componente esencial es el TMDL (Total Maximum Daily Load), que determina la carga máxima de contaminantes que un cuerpo de agua puede recibir sin comprometer su calidad (Britannica, 2025).

En el contexto agroindustrial, la CWA regula descargas de aguas residuales y lixiviados provenientes de plantas procesadoras, mataderos y CAFOs (Concentrated Animal Feeding Operations), imponiendo la obligación de implementar planes de manejo de nutrientes y control de escorrentía para evitar la contaminación por estiércol y fertilizantes. Asimismo, exige el pretratamiento obligatorio para industrias que descargan metales, grasas y otros contaminantes en sistemas municipales, lo que refuerza la responsabilidad compartida entre el sector privado y las autoridades locales (EPA, 2025). La CWA también prevé sanciones civiles y penales por incumplimiento, y otorga a los ciudadanos el derecho de acción para exigir el cumplimiento cuando las autoridades no actúan, consolidando un mecanismo de participación ciudadana en la protección ambiental (CWA Playbook, 2025).

#### 4.3.1.2. Clean Air Act (CAA)

Promulgada en 1963 y reformada en 1970 y 1990, establece el marco regulatorio para la protección de la calidad del aire en Estados Unidos, con el propósito de reducir los riesgos para la salud humana y el medio ambiente derivados de la contaminación atmosférica (Congress.gov, 2022). Entre sus elementos principales se encuentran los NAAQS (National Ambient Air Quality Standards), que fijan estándares nacionales para contaminantes criterio como ozono, partículas y dióxido de azufre. Además, la CAA regula las emisiones de contaminantes peligrosos, incluyendo 187 sustancias tóxicas y compuestos orgánicos volátiles, y desarrolla programas específicos para el control de lluvia ácida, la protección de la capa de ozono y la reducción de emisiones de fuentes móviles (EPA, 2025).

En la agroindustria, la CAA impone obligaciones a las plantas que utilizan calderas, hornos o incineradores, las cuales deben cumplir con límites de emisiones establecidos por la EPA. También exige el control de olores y gases en instalaciones de compostaje y digestión anaerobia, así como la mitigación de emisiones fugitivas de polvo y partículas en procesos agrícolas, lo que implica la adopción de tecnologías de filtración y sistemas de ventilación adecuados (IERE, 2025).

#### 4.3.1.3. Código de Regulaciones Federales (40 CFR) y Límites Máximos de Residuos (LMR)

El Título 40 del CFR compila las regulaciones ambientales emitidas por la EPA y constituye la base normativa para implementar leyes como la RCRA, CWA y CAA. Entre sus disposiciones más relevantes se encuentran el Subcapítulo I (Partes 239-299), que regula el manejo de residuos sólidos y peligrosos; el Subcapítulo N (Partes 400-471), que establece normas de efluentes industriales; y el Subcapítulo E (Partes 150-189), que regula programas de pesticidas. Asimismo, la Parte 180 fija tolerancias para residuos de pesticidas en alimentos, conocidas como Límites Máximos de Residuos (LMR), bajo la autoridad de los artículos 21 U.S.C. 321(q), 346a y

371 (eCFR, 2025). Estos límites son esenciales para garantizar la inocuidad alimentaria y la competitividad en mercados internacionales, ya que su determinación se basa en estudios toxicológicos y en prácticas agrícolas adecuadas (FAO, 2025).

4.3.2. NORMATIVAS EN EUROPA

El manejo adecuado de los residuos agroindustriales es esencial para reducir el impacto ambiental, proteger la salud pública y fomentar una economía circular. La Unión Europea ha desarrollado un marco normativo robusto que regula desde la generación hasta la disposición final de estos residuos, promoviendo su valorización como recursos útiles. Este enfoque busca transformar los residuos en insumos para nuevos procesos productivos, reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes y contribuyendo a la sostenibilidad del sector agroindustrial (Manglai.io, 2024).

4.3.2.1. Directiva Marco de Residuos (2008/98/CE)

La Directiva 2008/98/CE establece los principios fundamentales para la gestión de residuos en la Unión Europea. Su objetivo principal es proteger la salud humana y el medio ambiente mediante la prevención o reducción de los impactos negativos derivados de la generación y gestión de residuos, la tabla 25 detalla la jerarquía.

Tabla 25. Etapas del manejo y valorización de residuos.

Nivel	Acción	Descripción general
1	Prevención	Consiste en evitar la generación de residuos desde el origen, optimizando procesos, reduciendo el uso de materias primas y promoviendo el consumo responsable.
2	Reutilización	Implica volver a emplear productos o materiales sin necesidad de transformarlos, extendiendo su vida útil antes de que se conviertan en desechos.
3	Reciclaje	Proceso mediante el cual los materiales se transforman para ser reincorporados como materia prima en nuevos productos, reduciendo el consumo de recursos naturales.

Nivel	Acción	Descripción general
4	Valorización (incluida energética)	Comprende la recuperación de valor a partir de los residuos, ya sea mediante su uso como materia secundaria o su conversión en energía (biogás, combustibles, etc.).
5	Eliminación	Última alternativa en la jerarquía de gestión de residuos; implica la disposición final en vertederos o incineración sin recuperación de energía, priorizando la seguridad ambiental

Además, define el concepto de biorresiduos y promueve su recogida separada para facilitar el compostaje y la producción de biogás. Se establece el principio de “quien contamina paga” y la responsabilidad ampliada del productor, obligando a los Estados miembros a elaborar planes nacionales de gestión y prevención de residuos (EUR-Lex, 2008).

#### 4.3.2.2. Directiva (UE) 2018/851

Esta norma actualiza la Directiva Marco como parte del paquete de economía circular. Refuerza la recogida separada de biorresiduos y establece objetivos de reciclaje para residuos municipales proyectadas por año según se detalla en la tabla 26. También promueve la trazabilidad y el control de calidad en los procesos de reciclaje, asegurando que los materiales recuperados sean aptos para nuevos usos (EUR-Lex, 2018).

Tabla 26. Proyección de reciclaje.

Año	Objetivo de reciclaje (%)
2025	55 %
2030	60 %
2035	65 %

#### 4.3.2.3. Directiva de Vertederos (UE) 2018/850

La Directiva 2018/850 modifica la Directiva 1999/31/CE y busca reducir drásticamente el uso de vertederos. Limita al 10% la cantidad de residuos municipales que pueden ser depositados en ellos para el año 2035. Se incentiva el uso de alternativas sostenibles como el compostaje y la producción de biogás, que permiten transformar residuos orgánicos en energía y fertilizantes (EUR-Lex, 2018b).

#### **4.3.2.4. Reglamento de Envases y Residuos de Envases (PPWR)**

El Reglamento (UE) 2025/40 establece criterios de reciclabilidad y compostabilidad para envases utilizados en la agroindustria. Tiene un impacto directo en sectores como: Alimentación, comercio minorista, horeca (Hoteles, Restaurantes y Cafeterías)

Se busca reducir el uso de plásticos no reciclables y fomentar envases biodegradables, especialmente en productos frescos y procesados (EUR-Lex, 2025).

#### **4.3.2.5. Directiva de Emisiones Industriales (IED 2.0, revisión 2024)**

La Directiva 2024/1785 aplica a instalaciones agroindustriales de gran escala, reforzando la prevención de residuos y estableciendo multas por incumplimiento que pueden alcanzar hasta el 3% de la facturación anual. Esta directiva promueve el uso de tecnologías limpias y procesos más eficientes para minimizar la generación de residuos y emisiones contaminantes (Environment, 2024).

#### **4.3.2.6. Síntesis de las Normativas Europeas en el manejo de residuos agroindustriales**

La tabla 27 sintetiza las principales normativas europeas que regulan la gestión de residuos con incidencia directa en el sector agroindustrial. Estas disposiciones reflejan la evolución del marco legal hacia un modelo de economía circular basado en la prevención, reutilización y valorización de materiales. Además, establecen metas concretas de reciclaje, reducción del uso de vertederos y fomento de tecnologías limpias. Su aplicación impulsa la innovación en envases sostenibles, el aprovechamiento energético de residuos y la implementación de prácticas agrícolas responsables.



Tabla 27. Principales normativas europeas relacionadas con la gestión de residuos agroindustriales.

Normativa	Año	Objetivos	Economía circular	Importancia
Directiva Marco de Residuos (2008/98/CE)	2008	Establecer la jerarquía de residuos, definir los biorresiduos, promover la recogida separada y aplicar el principio de “quien contamina paga”.	Introduce el enfoque preventivo y la valorización de residuos.	Proporciona el marco legal base para la gestión de residuos en la UE, incentivando la recuperación de residuos orgánicos agroindustriales.
Directiva (UE) 2018/851	2018	Actualiza la Directiva 2008/98/CE; fija metas de reciclaje (55% en 2025, 60% en 2030, 65% en 2035) y refuerza la trazabilidad.	Refuerza la transición hacia la economía circular.	Mejora la eficiencia de los sistemas de recolección y reciclaje en la industria agroalimentaria.
Directiva de Vertederos (UE) 2018/850	2018	Limita al 10% los residuos municipales en vertederos para 2035, fomenta el compostaje y la producción de biogás.	Promueve la valorización energética y el aprovechamiento biotecnológico.	Reduce la disposición final y fomenta tecnologías sostenibles aplicables a residuos orgánicos agroindustriales.
Reglamento de Envases y Residuos de Envases (PPWR)	2025	Establece criterios de reciclabilidad y compostabilidad de envases agroindustriales.	Fomenta la innovación en materiales sostenibles.	Incentiva el uso de envases biodegradables y reciclables en la agroindustria.
Directiva de Emisiones Industriales (IED 2.0, revisión 2024)	2024	Aplica controles más estrictos a instalaciones agroindustriales; refuerza la prevención y sanciona el incumplimiento ambiental.	Integra control de emisiones y gestión de residuos.	Promueve la adopción de tecnologías limpias y eficientes en procesos agroindustriales.
Normativas específicas para residuos agrícolas	2024	Reducir residuos orgánicos, evitar la quema, fomentar prácticas de aprovechamiento local.	Impulsa la sostenibilidad rural y la bioeconomía.	Incentiva la valorización de residuos agrícolas mediante compostaje, biofertilizantes o biogás.

4.3.3. NORMATIVAS EN ASIA

La tabla 28 presenta una síntesis de las principales normativas internacionales relacionadas con la gestión de residuos y su aplicación en el ámbito agroindustrial. Estas regulaciones reflejan el compromiso de diversos países asiáticos con la economía circular, la reducción de plásticos y la valorización de desechos orgánicos.

Tabla 28. Normativas internacionales sobre gestión de residuos y su relevancia en el sector agroindustrial.

País	Normativa	Año	Objetivos clave	Indicadores de gestión	Importancia agroindustrial
China	Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental por Residuos Sólidos	2020	Clasificación obligatoria de residuos, prohibición de importación de plásticos, impulso a la economía circular.	Sistema nacional de reciclaje y gestores autorizados de residuos.	Promueve la transformación de residuos agroindustriales en biogás, compost y materiales reciclables.
India	<i>Solid Waste Management Rules, Plastic Waste Management Rules, Bio-Energy Mission</i>	2016	Regulación integral de residuos sólidos, prohibición de plásticos de un solo uso, fomento de energías renovables.	Promoción de alternativas biodegradables y cumplimiento de la Convención sobre Biodiversidad.	Facilita la valorización energética de residuos agrícolas y la reducción de contaminación plástica.
Japón	Ley de Reciclaje de Recursos	2001	Fomento de la reutilización de residuos industriales y desarrollo de tecnologías avanzadas de reciclaje.	Separación en origen y programas de educación ambiental.	Logra alta eficiencia en el reciclaje de residuos agroalimentarios mediante innovación tecnológica.
Corea del Sur	<i>Food Waste Recycling Law / Weight-Based Food Waste Fee</i>	2005 / 2013	Prohibición del vertido de residuos alimentarios y aplicación de tarifas según el peso generado.	Reciclaje superior al 97% de los residuos alimentarios.	Favorece el reciclaje de subproductos agroindustriales como cáscaras, pulpas y residuos orgánicos.

### 4.3.4. NORMATIVAS EN MEDIO ORIENTE

La tabla 29 resume las principales normativas y estrategias implementadas en países de Medio Oriente orientadas a la gestión sostenible de residuos. Estas políticas reflejan un avance progresivo hacia la economía circular mediante la reducción, reciclaje y valorización energética. Además, destacan el impulso de prácticas agroindustriales sostenibles, como la producción de biogás, compost y biofertilizantes, fortaleciendo la eficiencia ambiental y productiva del sector.

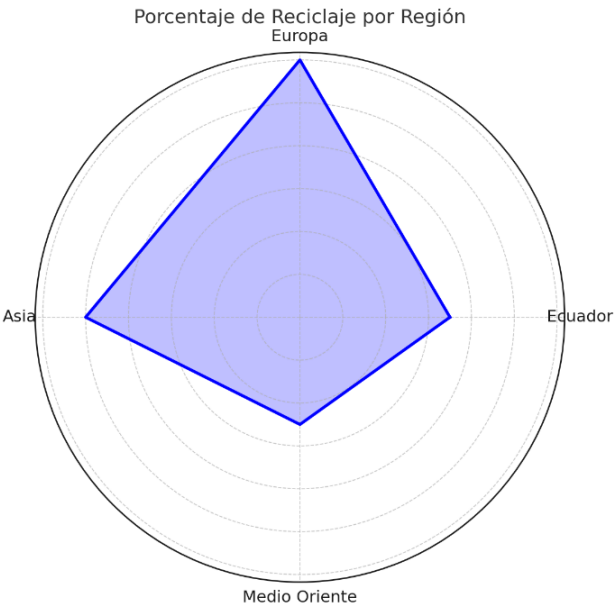
Tabla 29. Síntesis de normativas y estrategias de gestión de residuos en países de Medio Oriente.

País	Normativa	Año	Objetivos	Indicadores	Relevancia
Arabia Saudita	Ley Ambiental N.º 193 / <i>Visión 2030</i>	2001 / 2020	Gestión ambiental y transición energética.	Recolección: 80% / Reciclaje: 30%	Valorización de residuos agrícolas y producción de biogás.
Emiratos Arabes Unidos	Plan Nacional de Medio Ambiente / Ley de Biodiversidad	2016	Conservación de recursos y gestión sostenible.	Recolección: 85% / Reciclaje: 35%	Reutilización de residuos orgánicos en agricultura.
Turquía	Ley de Gestión de Residuos / Estrategia de Economía Circular	2011 / 2021	Reducción y reciclaje de residuos.	Reciclaje: ~25%	Aplicación de biogás en zonas rurales.
Irán	Ley de Protección Ambiental / Plan Nacional de Residuos	2004 / 2018	Control y reciclaje de residuos agrícolas.	Reciclaje: <20%	Fomento del compostaje y reducción de quema.
Israel	Ley de Residuos Sólidos / Estrategia de Innovación Verde	1993 / 2020	Minimización e innovación en reciclaje.	Reciclaje: >40%	Tecnologías avanzadas de reciclaje agroalimentario.
Egipto	Ley de Gestión de Residuos / Estrategia Nacional 2030	2020	Reducción de vertederos y educación ambiental.	Reciclaje: ~15%	Compostaje agrícola y biofertilizantes.

La figura 19 muestra una comparación del porcentaje de reciclaje entre diferentes regiones del mundo. Europa lidera con los niveles más altos de reciclaje, seguida por Asia, mientras que Ecuador y Medio Oriente

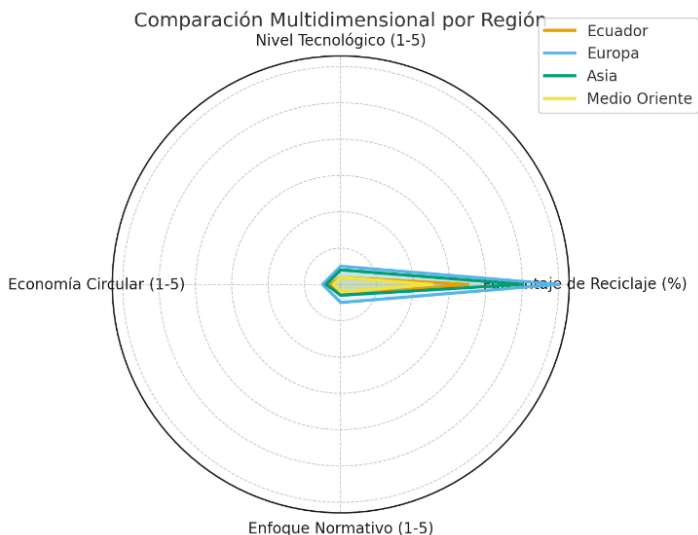
presentan valores más bajos. Este contraste evidencia las diferencias en políticas ambientales, infraestructura de gestión de residuos y nivel de desarrollo tecnológico que influyen directamente en la eficiencia de los sistemas de reciclaje.

Figura 19. Porcentaje de reciclaje por región.



La figura 20 analiza de manera integral el desempeño de las regiones en cuatro dimensiones clave: porcentaje de reciclaje, nivel tecnológico, enfoque normativo y grado de implementación de la economía circular. Se observa que Europa mantiene los valores más altos en todos los indicadores, reflejando una consolidada estructura regulatoria y tecnológica, mientras que Medio Oriente y Ecuador presentan mayores desafíos en la adopción de estrategias circulares y normativas efectivas.

Figura 20. Comparación Multidimensional por Región.



#### 4.4. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN INTEGRAL

La gestión integral de residuos agroindustriales se ha convertido en un eje estratégico para la sostenibilidad y la competitividad del sector agroalimentario. Este enfoque busca optimizar la recolección, tratamiento y valorización de los residuos mediante la aplicación de principios de economía circular y tecnologías limpias. Según JAIIO (2025), la implementación de modelos matemáticos y herramientas computacionales permite diseñar sistemas logísticos eficientes que integran procesos como el compostaje, la digestión anaeróbica para la producción de biogás y el pirólisis para la generación de bioenergía. Estas tecnologías no solo reducen la carga contaminante, sino que también convierten los residuos en insumos de alto valor agregado, como biofertilizantes y bioplásticos.

Un componente esencial de estas estrategias es la jerarquía de residuos, que establece un orden de prioridades: prevención, reutilización, reciclaje, valorización y eliminación. Este principio, ampliamente difundido en la normativa europea y adoptado en diversos estudios, busca minimizar la generación de desechos desde el origen y maximizar su

aprovechamiento (TecnoLógicas, 2022). La aplicación de esta jerarquía en la agroindustria implica rediseñar procesos productivos para reducir pérdidas, fomentar la reutilización de subproductos y garantizar que los residuos sean reincorporados a nuevos ciclos productivos mediante reciclaje o valorización energética.

La bioeconomía circular emerge como un paradigma que integra la jerarquía de residuos con el análisis de ciclo de vida, promoviendo la extracción de compuestos bioactivos y la generación de energía renovable a partir de biomasa residual. Estudios como el de la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (2025) destacan la importancia de tecnologías como la digestión anaeróbica y el compostaje para cerrar ciclos de materia y energía, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y la seguridad alimentaria.

Otro elemento clave en la gestión integral es la trazabilidad, que garantiza el seguimiento de los residuos desde su generación hasta su disposición final. La trazabilidad permite cumplir con normativas ambientales, reducir riesgos y optimizar procesos internos mediante plataformas digitales y auditorías (Waste Cero, 2025). En la agroindustria, la trazabilidad es fundamental para asegurar la inocuidad de los productos, la transparencia en la cadena de valor y la certificación de prácticas sostenibles.

#### **4.5. NORMATIVA ISO 14001 EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES**

La norma ISO 14001:2015 constituye uno de los pilares fundamentales para la gestión ambiental en el sector agroindustrial, al establecer un marco internacional que permite a las organizaciones implementar sistemas de gestión orientados a la mejora continua y al cumplimiento normativo. Su aplicación en el manejo de residuos agroindustriales es especialmente relevante debido a la complejidad y diversidad de los desechos generados en procesos como la transformación de alimentos, producción de bebidas, procesamiento de granos y actividades pecuarias. Estos residuos incluyen subproductos

orgánicos, efluentes líquidos y materiales de empaque, cuya gestión inadecuada puede generar impactos significativos en el suelo, el agua y la atmósfera.

ISO 14001 se basa en el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA), lo que implica que las empresas deben identificar los aspectos e impactos ambientales asociados a sus operaciones, establecer objetivos y metas, implementar controles operativos y evaluar periódicamente su desempeño. En el contexto agroindustrial, esto se traduce en la adopción de prácticas como la separación en la fuente, el compostaje, la digestión anaeróbica para la producción de biogás y la valorización energética de residuos, alineadas con los principios de economía circular y la jerarquía de residuos, se detalla en la figura 21.

Figura 21. Ciclo de la ISO 14001 en el manejo de residuos agroindustriales.



Un componente clave de ISO 14001 es la trazabilidad, que garantiza el seguimiento de los residuos desde su generación hasta su disposición final, mediante registros, auditorías internas y sistemas digitales. Esta trazabilidad no solo asegura el cumplimiento legal, sino que también facilita la certificación de productos bajo estándares de sostenibilidad, lo que incrementa la competitividad en mercados internacionales. Además, la norma exige la preparación de planes de contingencia y la capacitación

del personal, fortaleciendo la cultura organizacional orientada a la protección ambiental.

Diversos estudios y casos prácticos evidencian los beneficios de implementar ISO 14001 en la agroindustria. Por ejemplo, empresas peruanas y brasileñas han logrado reducir significativamente sus emisiones y efluentes, optimizar el uso de recursos y mejorar la disposición final de residuos mediante la adopción de esta norma (Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, 2017; UNJFSC, 2022; ResearchGate, 2019). Estos resultados demuestran que ISO 14001 no solo es una herramienta de cumplimiento, sino también un instrumento estratégico para la innovación, la eficiencia operativa y la responsabilidad social empresarial.

## **4.6. INCENTIVOS ECONÓMICOS Y FISCALES EN EL MANEJO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES**

Los incentivos económicos y fiscales constituyen herramientas estratégicas para promover la gestión sostenible de residuos agroindustriales. Estos mecanismos buscan estimular la adopción de prácticas de economía circular mediante beneficios financieros, tributarios y crediticios que faciliten la inversión en tecnologías limpias y procesos de valorización.

Entre los principales instrumentos se destacan:

### **4.6.1. EXONERACIONES TRIBUTARIAS Y DEDUCCIONES FISCALES:**

Se aplican a empresas que implementan sistemas de gestión integral de residuos, invierten en infraestructura para compostaje, biodigestión o reciclaje, y desarrollan proyectos de innovación verde. Estas deducciones pueden incluir la reducción del impuesto a la renta por inversiones en tecnologías ambientales y la exoneración del IVA en la adquisición de equipos para tratamiento de residuos.



#### 4.6.2. CRÉDITOS PREFERENCIALES Y LÍNEAS DE FINANCIAMIENTO VERDE:

Instituciones financieras y bancos de desarrollo ofrecen tasas de interés reducidas para proyectos orientados a la valorización de residuos agroindustriales, como plantas de biogás, producción de biofertilizantes y sistemas de separación en la fuente. Estos créditos suelen estar vinculados a programas nacionales de sostenibilidad y transición energética.

#### 4.6.3. SUBSIDIOS Y FONDOS CONCURSABLES:

Gobiernos y organismos internacionales destinan recursos para cofinanciar iniciativas de economía circular en el sector agroindustrial. Estos fondos apoyan la implementación de tecnologías limpias, la capacitación técnica y la certificación ambiental (ISO 14001), fortaleciendo la competitividad empresarial.

#### 4.6.4. CERTIFICACIÓN Y ETIQUETADO VERDE:

Las empresas que cumplen con estándares ambientales pueden acceder a mercados diferenciados y obtener beneficios económicos indirectos, como mejores precios y posicionamiento comercial. La certificación ISO 14001, por ejemplo, no solo garantiza el cumplimiento normativo, sino que también abre oportunidades en cadenas globales que exigen prácticas sostenibles.

#### 4.6.5. INCENTIVOS POR REDUCCIÓN DE EMISIONES:

Algunos países integran la gestión de residuos agroindustriales en esquemas de bonos de carbono y mecanismos de compensación, permitiendo a las empresas generar ingresos adicionales por la mitigación de gases de efecto invernadero mediante procesos como la digestión anaeróbica.

## 4.7. ROL DE LOS GOBIERNOS NACIONALES E INTERNACIONALES EN EL MANEJO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

En Ecuador y América Latina, las alianzas público-privadas (APP) se han consolidado como mecanismos estratégicos para impulsar la infraestructura y los servicios relacionados con la gestión integral de residuos agroindustriales. Estas alianzas se enmarcan en políticas como el Código Orgánico del Ambiente (COA) y la Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva, que establecen obligaciones para los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) en la implementación de sistemas integrales de gestión (Asamblea Nacional, 2017; Asamblea Nacional, 2021). El objetivo es garantizar que los residuos generados en procesos agroindustriales sean tratados bajo principios de sostenibilidad y economía circular, reduciendo impactos ambientales y fomentando la valorización de subproductos. Las APP permiten compartir riesgos entre el sector público y privado, optimizar recursos y mejorar la calidad de los proyectos mediante incentivos adecuados y esquemas de gobernanza transparente (BID, 2023). En la práctica, estas alianzas han facilitado la construcción de plantas de compostaje, biodigestores para la producción de biogás y centros de reciclaje, aprovechando la experiencia del sector privado en innovación tecnológica y eficiencia operativa.

En Estados Unidos, las APP son esenciales para proyectos orientados a la sostenibilidad y la gestión de residuos, especialmente en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El sector público aporta regulación, control y planificación, mientras que el privado ofrece capital, tecnología y experiencia para desarrollar soluciones como plantas de energía renovable, sistemas avanzados de reciclaje y plataformas digitales para trazabilidad (UNOPS, 2023). Estas alianzas han permitido la implementación de proyectos de waste-to-energy, que convierten residuos orgánicos en energía eléctrica, reduciendo la dependencia de vertederos y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se han desarrollado sistemas inteligentes para la segregación en la fuente y

la optimización de rutas de recolección, lo que contribuye a la eficiencia logística y la reducción de costos operativos.

En Europa, la Unión Europea ha promovido activamente las APP como parte de su estrategia para cumplir con directivas como la Directiva Marco de Residuos (2008/98/CE) y el Plan de Acción de Economía Circular. Estas alianzas permiten a los municipios compartir responsabilidades con empresas privadas en la recolección, reciclaje y valorización energética, garantizando el cumplimiento de metas ambientales establecidas por la normativa comunitaria (ALBA Group, 2022). Modelos exitosos en países como Alemania y España demuestran que la colaboración público-privada reduce costos, mejora la eficiencia y fomenta la innovación tecnológica en áreas como el reciclaje químico, la trazabilidad digital y la producción de biogás a partir de residuos agroindustriales. La UE también incentiva la adopción de contratos a largo plazo que aseguren estabilidad financiera y tecnológica, promoviendo la inversión privada en proyectos sostenibles.

Por su parte, en Asia, países como India, China y Nepal han implementado APP para enfrentar los desafíos asociados a la gestión de residuos agroindustriales en contextos de rápido crecimiento urbano y alta generación de desechos. Proyectos como PPP4Gs en Nepal son ejemplos de cómo la cooperación público-privada puede generar empleo verde, mejorar la segregación en la fuente y convertir residuos en compost y materiales reciclables (SWITCH-Asia, 2023). El Banco Asiático de Desarrollo (ADB) recomienda crear entornos habilitantes para APP en proyectos de waste-to-energy, integrando financiamiento, tecnología y gobernanza colaborativa para alcanzar la visión de “cero residuos” en ciudades asiáticas (ADB, 2023). Estas iniciativas también incluyen la implementación de sistemas de trazabilidad y plataformas digitales que permiten monitorear el flujo de residuos, garantizar la transparencia y cumplir con estándares internacionales de sostenibilidad.

Finalmente, en Medio Oriente, las APP son clave para reducir la dependencia de vertederos y avanzar hacia la economía circular. Países como Emiratos Árabes Unidos y Arabia Saudita han desarrollado proyectos

conjuntos para la construcción de plantas de reciclaje, sistemas inteligentes de recolección y plantas de valorización energética, alineadas con planes nacionales como Saudi Visión 2030 y UAE Net Zero 2050 (Saudi Visión 2030, 2023; UAE Net Zero, 2023). Estas alianzas fortalecen la sostenibilidad económica y ambiental, impulsando la innovación y la inversión privada en tecnologías limpias. Además, integran políticas regulatorias y mecanismos de participación comunitaria, asegurando que los beneficios de la economía circular se extiendan a todos los actores de la cadena de valor. La región MENA también apuesta por la digitalización de procesos y la certificación ambiental como herramientas para mejorar la competitividad y atraer inversión extranjera.

#### 4.8. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD Y ECONOMÍA CIRCULAR

La implementación de indicadores de sostenibilidad y economía circular en el manejo de residuos agroindustriales se ha convertido en una herramienta esencial para evaluar el impacto ambiental, social y económico de las prácticas productivas, así como para orientar la transición hacia modelos más responsables y resilientes. Estos indicadores permiten medir el grado de eficiencia en el uso de recursos, la reducción de emisiones, la valorización de subproductos y la regeneración de ecosistemas, aspectos clave en la agroindustria, donde la generación de residuos orgánicos es significativa. Según Khan et al. (2025), la economía circular se fundamenta en principios como el diseño para la reutilización, la regeneración de sistemas naturales y la minimización de desperdicios mediante estrategias de reciclaje, compostaje y aprovechamiento energético. En este contexto, los indicadores de circularidad no solo evalúan la cantidad de residuos reciclados, sino también la capacidad de los sistemas productivos para mantener los materiales en uso y reducir la dependencia de materias primas vírgenes, lo que contribuye a disminuir la presión sobre los ecosistemas y a mitigar el cambio climático.

Diversos estudios han propuesto marcos metodológicos para medir la circularidad en la agroindustria. Kulakovskaya et al. (2022) destacan

la necesidad de indicadores económicos (eCEIs) que permitan evaluar el impacto financiero de la implementación de estrategias circulares en las cadenas de valor, considerando variables como ahorro en costos de disposición, generación de ingresos por subproductos y eficiencia en el consumo energético. Sin embargo, los autores advierten que la mayoría de los indicadores actuales presentan limitaciones en cuanto a su enfoque sistémico y transparencia, por lo que recomiendan combinar métricas económicas con indicadores ambientales y sociales para obtener una visión integral del desempeño sostenible. En la misma línea, Van Hoof et al. (2022) proponen una metodología para América Latina y el Caribe que incluye indicadores como la tasa de reciclaje de residuos agroindustriales, el porcentaje de biomasa valorizada, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de empleo verde, subrayando la importancia de adaptar estos indicadores al contexto regional y a las capacidades tecnológicas disponibles.

Desde una perspectiva técnica, Bandh et al. (2024) señalan que los indicadores de sostenibilidad deben considerar el ciclo de vida completo de los productos agroindustriales, incorporando métricas como la huella de carbono, la huella hídrica y el índice de eficiencia energética en los procesos de transformación de residuos. Estos indicadores permiten identificar puntos críticos en la cadena productiva y diseñar estrategias para reducir impactos, como la implementación de tecnologías de digestión anaeróbica, pirólisis y gasificación, que convierten residuos en biogás, biochar y otros productos de valor agregado (Aguiar Novillo et al., 2022). Además, la trazabilidad emerge como un componente esencial en la medición de la sostenibilidad, ya que garantiza el seguimiento de los residuos desde su generación hasta su disposición final, facilitando la certificación ambiental y el cumplimiento normativo (Waste Cero, 2025).

En el ámbito normativo y empresarial, la Fundación Ellen MacArthur y la Comisión Europea han desarrollado marcos de referencia que incluyen indicadores como la tasa de circularidad material (porcentaje de materiales recuperados frente al total consumido), la intensidad de uso de recursos y

la proporción de productos diseñados bajo criterios de ecodiseño (ASYPS, 2025). Estos indicadores son fundamentales para monitorear el avance hacia los objetivos de la economía circular establecidos en políticas públicas y estrategias corporativas. No obstante, Saidani et al. (2019) advierten que la falta de estandarización en los sistemas de medición dificulta la comparación entre sectores y regiones, lo que plantea la necesidad de armonizar criterios y desarrollar plataformas digitales que integren datos en tiempo real.

Los indicadores sociales también desempeñan un papel relevante en la evaluación de la sostenibilidad, ya que reflejan el impacto de las prácticas circulares en la generación de empleo, la inclusión de recicladores de base y la mejora en las condiciones laborales. Pérez Martínez (2021) subraya que la economía circular en el sector agroindustrial no solo busca reducir impactos ambientales, sino también promover la equidad social y la prosperidad económica, lo que implica incorporar métricas relacionadas con la participación comunitaria y la distribución de beneficios en las cadenas de valor.

Por otro lado, los indicadores de innovación tecnológica, como el número de patentes relacionadas con tecnologías limpias y la inversión en investigación y desarrollo, son esenciales para medir la capacidad del sector agroindustrial de adaptarse a los desafíos de la sostenibilidad (Palomino Ávila et al., 2024). La literatura reciente enfatiza que la transición hacia una economía circular requiere no solo cambios en los procesos productivos, sino también en los modelos de negocio, adoptando esquemas basados en la simbiosis industrial, la logística inversa y la digitalización para optimizar la gestión de residuos (Khan et al., 2025; Kirchherr et al., 2017). En la tabla 30 se detalla la información.

Tabla 30. Indicadores de sostenibilidad en la gestión de residuos agroindustriales.		
Indicador	Unidad / Valor estimado	Fuente
Tasa de reciclaje de residuos agroindustriales	40 % – 65 %	Van Hoof et al., 2022
Porcentaje de biomasa valorizada	30 % – 50 %	Van Hoof et al., 2022; Aguiar Novillo et al., 2022

<b>Indicador</b>	<b>Unidad / Valor estimado</b>	<b>Fuente</b>
Reducción de emisiones GEI	10 % – 25 %	Bandh et al., 2024
Huella de carbono	Reducción hasta 30 % según tecnología	Bandh et al., 2024
Huella hídrica	m <sup>3</sup> /tonelada	Bandh et al., 2024
Índice de eficiencia energética	0.6 – 0.9	Bandh et al., 2024; Aguiar Novillo et al., 2022
Tasa de circularidad material	20 % – 30 %	ASYPS, 2025
Generación de empleo verde	100 – 500 empleos por planta	Van Hoof et al., 2022
Inversión en I+D	2 % – 5 % del presupuesto anual	Palomino Ávila et al., 2024
Número de patentes en tecnologías limpias	10 – 50 patentes por año	Palomino Ávila et al., 2024
Participación comunitaria	60 % – 80 %	Pérez Martínez, 2021

# CAPÍTULO 5

## INNOVACIÓN Y TENDENCIAS FUTURAS

### 5.1. INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y BIG DATA EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS

La gestión de residuos agroindustriales constituye uno de los retos más importantes en el contexto actual de sostenibilidad y eficiencia productiva. El incremento de la producción agrícola y agroindustrial genera grandes volúmenes de desechos que, si no se gestionan adecuadamente, pueden ocasionar impactos ambientales significativos, como contaminación del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero y pérdida de biodiversidad.

En este escenario, la Inteligencia Artificial (IA) y el Big Data se presentan como herramientas estratégicas para optimizar procesos, reducir costos y promover la economía circular. Estas tecnologías permiten transformar la manera en que se recolectan, procesan y valorizan los residuos, integrando análisis predictivo, automatización y toma de decisiones basada en datos.

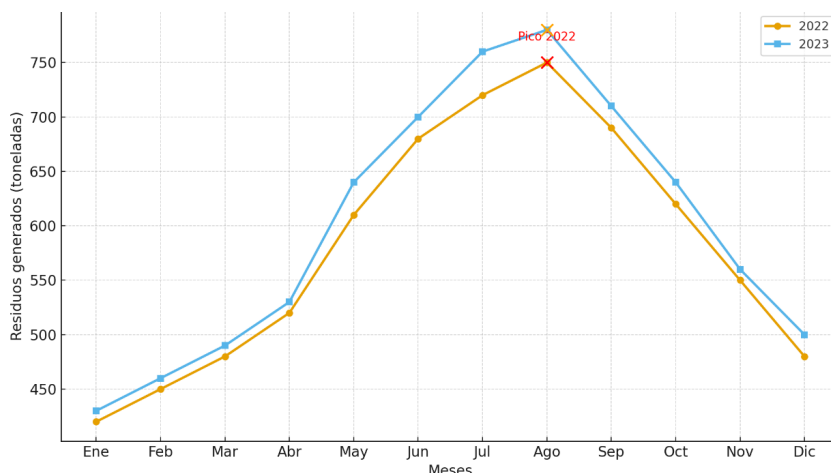
#### 5.1.1. GESTIÓN INTELIGENTE DE DATOS EN LA AGROINDUSTRIA

El Big Data se refiere a la capacidad de recopilar, almacenar y analizar grandes volúmenes de información generada en procesos agroindustriales. Su aplicación contribuye a resolver problemas como la seguridad alimentaria, el control de plagas y la de recursos optimización mediante análisis predictivos y modelos de simulación



(Ingebook, 2023). La gestión inteligente de datos mejora la rentabilidad y sostenibilidad, integrando información de sensores, sistemas ERP y plataformas IoT para una toma de decisiones más precisa (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023). Esto se traduce en una reducción de desperdicios y una mejor planificación de recursos. Por ejemplo, el análisis de datos históricos sobre la generación de residuos permite anticipar picos de producción y diseñar estrategias para su aprovechamiento, evitando acumulaciones que puedan generar riesgos ambientales, según se detalla en la figura 22 (CIAD, 2023).

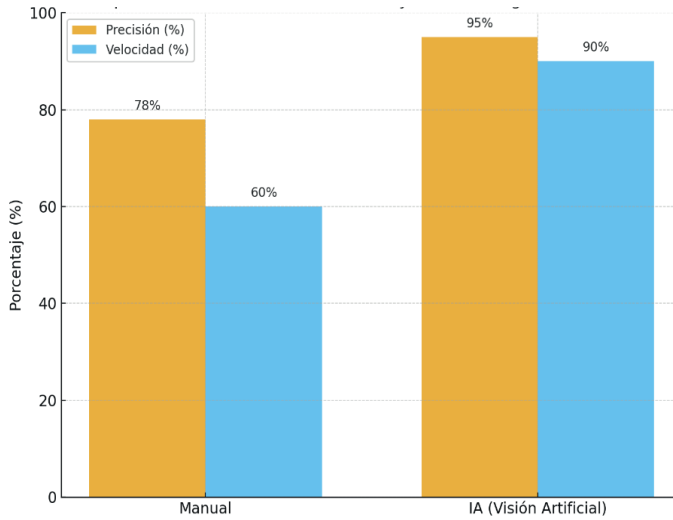
Figura 22. Tendencia histórica de generación de residuos.



### 5.1.2. APLICACIÓN DE IA EN CLASIFICACIÓN Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO

La IA se utiliza para la clasificación automática de residuos mediante visión artificial y redes neuronales, reduciendo errores humanos y acelerando procesos (Recytrans, 2023). Los sistemas de visión artificial pueden diferenciar entre tipos de materiales, separando orgánicos e inorgánicos con alta precisión según se detalla en la figura 23.

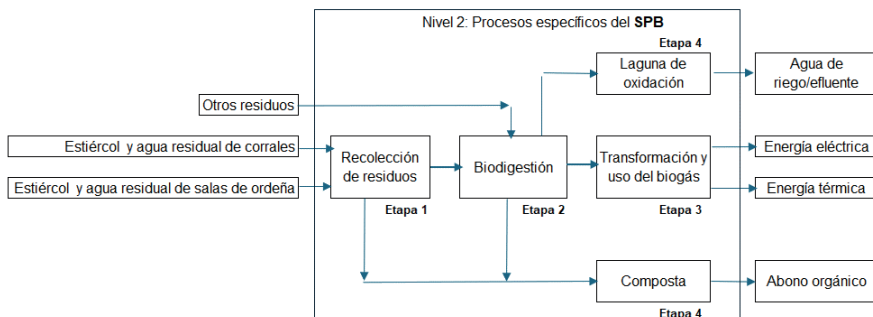
Figura 23. Comparación entre manual e Inteligencia Artificial.



Asimismo, el mantenimiento predictivo basado en Big Data permite anticipar fallos en plantas de tratamiento, evitando paradas no programadas y optimizando la vida útil de equipos (Marcial Pons, 2023). Estas soluciones incrementan la eficiencia operativa y reducen costos asociados a interrupciones, contribuyendo a la continuidad de las operaciones y a la sostenibilidad del negocio.

Un caso práctico es el uso de algoritmos de aprendizaje automático para detectar anomalías en el funcionamiento de digestores anaerobios, evitando pérdidas en la producción de biogás, según se detalla en la figura 24 (Banco Interamericano de Desarrollo, 2023).

Figura 22. Biodigestor (Producción de biogas Adaptada de CienciAcierta (2017).



## 5.2. ECONOMÍA CIRCULAR Y MODELOS PREDICTIVOS

La economía circular se presenta como un modelo disruptivo frente al esquema lineal tradicional de “extraer, producir, desechar”, proponiendo la valorización de residuos como insumos para nuevos procesos productivos. En la agroindustria, este enfoque permite transformar subproductos en recursos útiles, tales como biogás, biofertilizantes y bioplásticos, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales y al incremento de la competitividad del sector. Por ejemplo, la digestión anaeróbica de residuos agrícolas genera energía renovable y fertilizantes orgánicos, cerrando ciclos de materiales y energía (Molina-Morejón et al., 2025; Romero-Sáez, 2022). Este modelo no solo disminuye la dependencia de insumos externos, sino que también promueve la resiliencia económica y social en comunidades rurales, alineándose con los principios de sostenibilidad y bioeconomía (Preciado-Saldaña et al., 2022).

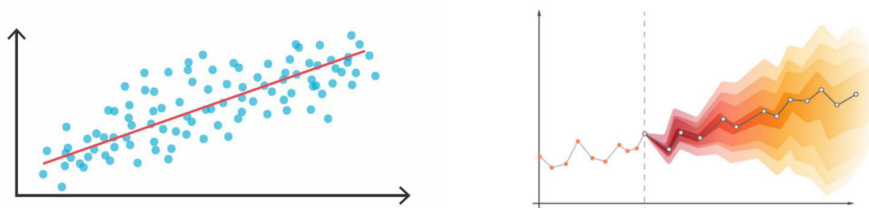
La integración de tecnologías digitales potencia la eficiencia de la economía circular en la agroindustria. Herramientas como Inteligencia Artificial (IA), Big Data y modelos matemáticos permiten optimizar procesos mediante análisis predictivo, control de variables críticas y simulación de escenarios productivos (Aponte, 2024; Buhigas, 2024). Estas tecnologías facilitan la toma de decisiones basada en datos, reducen costos operativos y mejoran la trazabilidad de los flujos de materiales, garantizando procesos más sostenibles y rentables. La convergencia entre economía circular y digitalización constituye, por tanto, un eje estratégico para la transición hacia sistemas agroindustriales inteligentes y resilientes (Salgado-Tello et al., 2024).

### 5.2.1. MODELOS PREDICTIVOS

Los modelos predictivos constituyen herramientas esenciales en la gestión sostenible de residuos agroindustriales, permitiendo anticipar volúmenes, optimizar procesos y mejorar la eficiencia en la valorización de

subproductos. A través del análisis matemático y estadístico de variables clave como la producción agrícola, la temperatura, la masa residual o los patrones históricos, estos modelos proporcionan estimaciones precisas que facilitan la toma de decisiones en entornos de alta incertidumbre, según se detalla en la figura 25.

Figura 25. Modelos predictivos (regresión, series de tiempo).



La Regresión Lineal Múltiple se aplica ampliamente para predecir la generación de residuos en función de factores productivos y demográficos, mientras que los Modelos de Series de Tiempo (ARIMA) permiten proyectar tendencias futuras basadas en datos históricos. Por su parte, la Valorización de Subproductos mediante regresión aplicada al biogás optimiza las condiciones de fermentación en biodigestores. La Programación Lineal orienta la optimización logística, minimizando costos de transporte y mejorando la distribución en cadenas circulares. Finalmente, los Modelos Cinéticos de Compostaje simulan la degradación biológica para controlar variables críticas como la humedad, la temperatura y la aireación, la figura 26 detalla los modelos matemáticos.

Tabla 31. Modelos predictivos aplicados a la gestión de residuos agroindustriales.

N.º	Modelo Predictivo	Ecuación Base	Variables Principales
1	Regresión Lineal Múltiple	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$	Producción agrícola (X1), población (X2), consumo energético (X3).
2	Series de Tiempo (ARIMA)	$Y_t = \alpha + \sum \phi_i Y(t-i) + \sum \theta_i \varepsilon(t-i) + \varepsilon_t$	Valores históricos (Yt), errores pasados (εt-i), tendencia temporal.
3	Valorización de Subproductos (Biogás)	$G = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 T + \beta_2 M + \varepsilon$	Presión (P), temperatura (T), materia orgánica (M).
4	Optimización Logística (Programación Lineal)	$\text{Min } Z = \sum c_i (u, mn)$ Sujeto a: $\sum x_i \geq b_i$ ; $\sum x_j = k_j$	Rutas, costos logísticos, capacidad de plantas.
5	Modelos Cinéticos para Compostaje	$dM/dt = -k_1 M$ ; $dT/dt = k_2 (T_{amb} - T)$	Masa orgánica (M), temperatura (T), calor microbiano.

### 5.3. BIOLOGÍA SINTÉTICA Y NANOTECNOLOGÍA PARA BIOPRODUCTOS

La creciente demanda de soluciones sostenibles en la industria alimentaria, farmacéutica y agrícola ha impulsado el desarrollo de tecnologías emergentes como la biología sintética y la nanotecnología. Ambas disciplinas convergen en la creación de bioproductos innovadores, que incluyen compuestos funcionales, biopolímeros, nanoanticuerpos y materiales biodegradables.

#### 5.3.1. BIOLOGÍA SINTÉTICA: DISEÑO Y APLICACIONES

La biología sintética se centra en la ingeniería de rutas metabólicas para optimizar la producción de compuestos de interés. Ortuño-Fajardo et al. (2021) señalan que mediante la modificación genética de microorganismos es posible obtener enzimas y saborizantes para la industria alimentaria, reduciendo costos y mejorando la eficiencia. Por otro lado, Medina Martínez et al. (2024) amplían el panorama al incluir aplicaciones en medicina, agricultura,

biocombustibles y materiales biodegradables, lo que posiciona a la biología sintética como un eje estratégico para la sostenibilidad. Finalmente, el diseño computacional de rutas biosintéticas mediante herramientas como novoStoic, RetroPath y BNICE permite generar biocombustibles y químicos verdes con alta precisión.

5.3.2. NANOTECNOLOGÍA APLICADA A BIOPRODUCTOS

La nanotecnología complementa la biología sintética al ofrecer soluciones para la funcionalización y mejora de materiales. Huaman-Moran et al. (2024) destacan el uso de nanomateriales y biopolímeros en envases alimentarios con propiedades antimicrobianas, contribuyendo a la reducción del desperdicio y la seguridad alimentaria. En el ámbito biomédico, Ortega-Portilla et al. (2021) describen el desarrollo de nanoanticuerpos, que presentan alta estabilidad y especificidad, con aplicaciones en diagnóstico y terapias avanzadas. Además, Armendaris-Barragán y Galindo-Rodríguez (2018) subrayan el papel de la nanotecnología en agricultura, alimentos y medio ambiente, consolidando su relevancia en la transición hacia sistemas productivos sostenibles, en la tabla 32 se detalla la información.

Tabla 32. Variables determinantes en el diseño de rutas metabólicas en biología sintética.

Categoría	Variable	Descripción	Aplicación	Referencia
Biológica	Microorganismo huésped	Organismo modificado genéticamente (bacterias, levaduras).	Determina la capacidad metabólica, la tasa de crecimiento y la viabilidad del proceso.	Ortuño-Fajardo et al., 2021
Bioquímica	Ruta metabólica objetivo	Conjunto de reacciones enzimáticas modificadas o rediseñadas.	Base del proceso de ingeniería metabólica para producir compuestos de interés.	Avances en biología sintética, 2025

Categoría	Variable	Descripción	Aplicación	Referencia
Genética	Genes introducidos / suprimidos	Modificaciones del ADN que activan o inhiben rutas biosintéticas.	Permite controlar la producción de enzimas, aminoácidos o metabolitos secundarios.	Ortuño-Fajardo et al., 2021
Enzimática	Actividad catalítica (Vmax, Km)	Parámetros cinéticos que describen la eficiencia enzimática.	Afecta directamente el rendimiento y la velocidad de la biosíntesis.	Medina Martínez et al., 2024
Computacional	Herramientas de diseño (novoStoic, RetroPath, BNICE)	Software de simulación para predicción y optimización de rutas biosintéticas.	Reduce el tiempo de desarrollo y mejora la precisión del diseño de bioprocesos.	Avances en el diseño de caminos de biología sintética, 2025
Fisiológica	Condiciones de cultivo (T, pH, oxígeno, nutrientes)	Variables de operación en biorreactores.	Controlan el crecimiento celular y la producción del metabolito deseado.	Medina Martínez et al., 2024
Industrial	Rendimiento del producto (g/L)	Cantidad de compuesto obtenido por unidad de volumen.	Indicador clave de eficiencia económica del bioproceso.	Ortuño-Fajardo et al., 2021
Ambiental	Uso de residuos orgánicos como sustrato	Empleo de biomasa residual en lugar de materias primas vírgenes.	Favorece la sostenibilidad y la economía circular.	Medina Martínez et al., 2024
Energética	Eficiencia energética del proceso	Relación entre energía consumida y producto generado.	Relevante en biocombustibles y bioplásticos sostenibles.	Avances en biología sintética, 2025
Regulatoria	Bioseguridad y trazabilidad	Protocolos que controlan el uso y liberación de organismos modificados.	Minimiza riesgos ambientales y garantiza cumplimiento normativo.	Medina Martínez et al., 2024
Tecnológica	Integración con IA y Big Data	Aplicación de inteligencia artificial para optimización en tiempo real.	Mejora la predicción de resultados y acelera el diseño experimental.	Avances en biología sintética, 2025

Categoría	Variable	Descripción	Aplicación	Referencia
Socioeconómica	Aceptación social y marco ético	Nivel de aceptación pública y regulación de bioproductos.	Determina la adopción de tecnologías de biología sintética a gran escala.	Medina Martínez et al., 2024

#### 5.4. PROYECCIONES GLOBALES DEL MANEJO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES (2030–2050)

La generación de residuos agroindustriales se encuentra en una fase crítica debido al crecimiento poblacional, la intensificación agrícola y la expansión de la agroindustria. Según el Banco Mundial y la ONU, la producción global de residuos sólidos podría aumentar un 70 % para 2050, alcanzando cifras superiores a 3.8 mil millones de toneladas anuales, si no se implementan medidas urgentes de mitigación (Banco Mundial, 2021; UNEP, 2022). Este incremento está directamente vinculado al modelo económico lineal predominante, basado en “extraer, fabricar, consumir y desechar”, que genera grandes volúmenes de desechos orgánicos y subproductos agroindustriales como bagazo, cascarillas, pajas y residuos líquidos (García, 2020).

Las proyecciones hacia 2030–2050 indican una transición acelerada hacia la economía circular y la bioeconomía, donde los residuos agroindustriales serán considerados recursos estratégicos para la producción de bioenergía, bioplásticos, fertilizantes y compuestos de alto valor agregado. Se prevé que la digestión anaeróbica y los sistemas de biorrefinería integrados se conviertan en tecnologías dominantes, permitiendo la conversión de biomasa lignocelulósica en biogás, bioetanol y bioproductos mediante procesos como ALACEN (Alcalino-Ácido-Enzimático), que optimizan la extracción de celulosa y azúcares fermentables (TechBioTrends, 2023).

En paralelo, la digitalización y la automatización transformarán la gestión de residuos. Tecnologías como inteligencia artificial (IA), Internet de las Cosas (IoT) y blockchain permitirán la trazabilidad completa de



los residuos, optimizando la recolección, clasificación y valorización en tiempo real. Estas innovaciones reducirán costos operativos y emisiones asociadas al transporte, además de garantizar transparencia en la cadena de suministro (ElReciclaje, 2022; RCBTrace, 2023).

A nivel normativo, se espera un endurecimiento de las regulaciones ambientales y la adopción global de políticas de responsabilidad extendida del productor, que obligarán a las empresas agroindustriales a implementar sistemas de gestión sostenible. Las metas más ambiciosas apuntan a cero residuos en países desarrollados para 2050, con tasas de reciclaje superiores al 80 %, mientras que en regiones emergentes se proyecta una reducción significativa del vertido a cielo abierto mediante incentivos para la valorización energética y el compostaje industrial (Reciclaje y Gestion, 2023; RecyclingToday, 2023).

## **5.5. DIGITALIZACIÓN TOTAL DE PLANTAS AGROINDUSTRIALES**

La digitalización total de plantas agroindustriales constituye una transformación profunda en la manera en que se gestionan los procesos productivos. Este concepto implica la conversión de procedimientos analógicos en sistemas digitales mediante la integración de sensores, plataformas IoT, software de gestión y herramientas de análisis de datos en tiempo real. La finalidad es crear un ecosistema interconectado que permita la toma de decisiones basada en información precisa y actualizada. Cuando esta digitalización se combina con la automatización, se obtienen beneficios significativos como la gestión eficiente de recursos, la trazabilidad completa de los productos, la reducción de errores humanos y la mejora sustancial en la calidad del producto final, la figura 27 detalla el control avanzado en la industria química.

Figura 27. Digitalización de la industria.



## 5.6. CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS POR ROBOTS

La crisis mundial de residuos exige soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas de gestión de residuos. Un enfoque revolucionario es la integración de robots de reciclaje, impulsados por inteligencia artificial (IA) y tecnologías avanzadas de automatización. Estos robots están transformando la gestión de residuos al mejorar la precisión de la clasificación, reducir costes y aumentar las tasas de reciclaje. Con más de 2.010 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos generados anualmente en todo el mundo, según el Banco Mundial, los sistemas tradicionales de gestión de residuos tienen dificultades para mantenerse al día. Los procesos de clasificación manual son lentos, costosos y, a menudo, propensos a errores, lo que genera ineficiencias y bajas tasas de reciclaje. A nivel mundial, solo el 9% de los residuos plásticos se recicla, en gran medida debido a la contaminación y a una clasificación inadecuada. La automatización, en particular mediante robots de reciclaje, aborda estos desafíos garantizando precisión y rapidez en la clasificación de residuos, la tabla 33 detalla la información.

Tabla 33. Tecnologías y Aplicaciones de los Robots de Reciclaje en la Gestión de Residuos.

Aspecto clave	Variable esencial	Síntesis
Tecnologías	Visión artificial e IA	Detectan y clasifican materiales por color, forma y textura mediante sensores y algoritmos.
	Brazos robóticos	Ejecutan la separación y manipulación de residuos con alta precisión.

Aspecto clave	Variable esencial	Síntesis
Beneficios	Precisión y eficiencia	Alcanzan hasta 98% de exactitud y procesan más ítems por minuto que el trabajo manual.
	Costos y seguridad	Reducen costos operativos y riesgos para trabajadores.
Aplicaciones	Urbanos, industriales, plásticos y electrónicos	Clasificación de residuos domésticos, industriales, plásticos y componentes electrónicos.
Innovaciones	AMP, Tomra, ZenRobotics	Robots IA de alta capacidad, sensores NIR y sistemas 24/7 para residuos complejos.
Tendencias	IoT, análisis predictivo, automatización	Optimización en tiempo real, predicción de flujos de residuos y sistemas totalmente automatizados.

## 5.7. TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN LA GESTIÓN Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

La gestión de residuos agroindustriales ha experimentado un avance notable impulsado por tecnologías emergentes que permiten transformar subproductos en recursos estratégicos. Esta evolución responde a la necesidad de fortalecer modelos productivos sostenibles, disminuir las emisiones y consolidar esquemas de economía circular basados en procesos de alta eficiencia y control avanzado. En este marco, tecnologías como los biomateriales avanzados, los biosensores, la nanotecnología aplicada y la Inteligencia Artificial (IA) generativa están redefiniendo la forma en que la agroindustria monitorea, procesa y valoriza sus residuos.

Los biomateriales avanzados, obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica, bagazo, cáscaras, almidones y otros residuos orgánicos, constituyen alternativas biodegradables con potencial para sustituir polímeros derivados del petróleo, favoreciendo cadenas productivas de menor impacto ambiental. Paralelamente, los biosensores permiten un control en tiempo real de variables críticas como humedad, pH, actividad enzimática, carga microbiana y emisiones gaseosas (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>), lo que mejora la eficiencia de procesos como el compostaje y la digestión anaerobia.

La IA generativa se posiciona como una herramienta clave para la optimización avanzada de bioprocesos. Su capacidad para integrar grandes volúmenes de datos, generar modelos predictivos y ajustar parámetros operativos permite convertir procesos tradicionalmente empíricos en sistemas altamente controlados. Esto se traduce en compostajes más rápidos, menores emisiones, uniformidad en la calidad final y un uso más eficiente de microorganismos especializados.

Para el periodo 2030–2050 se proyecta una adopción acelerada de estas tecnologías, impulsada por la automatización, el Internet de las Cosas (IoT), la computación cuántica aplicada a biorrefinerías y plataformas digitales integradas. Esta convergencia tecnológica incrementará la eficiencia operativa, mejorará la rentabilidad y consolidará el aprovechamiento de residuos como insumos esenciales para la producción de bioenergía, bioproductos y materiales de alto valor agregado. En este escenario, la gestión de residuos evolucionará hacia sistemas totalmente automatizados, trazables y alineados con objetivos globales de sostenibilidad y mitigación climática, la tabla 34 detalla la información.

Tabla 34. Tecnologías emergentes de residuos agroindustriales.

Tecnología	Aplicación principal	Beneficios clave	Limitaciones actuales	Proyección futura (2030–2050)
Biomateriales avanzados (bioplásticos, biopolímeros, nanocompuestos)	Producción de envases biodegradables, filmes activos, biopolímeros a partir de bagazo, cáscaras, almidón y subproductos.	Reducción de plásticos convencionales; biodegradabilidad; valorización de residuos; alto potencial industrial.	Costos de producción elevados; menor resistencia comparada con polímeros sintéticos; escalabilidad limitada.	Materiales con mayor durabilidad; biorrefinerías integradas; bioplásticos competitivos en costo; uso masivo en agricultura y alimentos.
Biosensores agroindustriales	Monitoreo de compostaje, digestión anaerobia, calidad del agua residual, actividad microbiana, gases (CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> ).	Datos en tiempo real; alta precisión; control de procesos biológicos; reducción de pérdidas.	Fragilidad de sensores; necesidad de calibración; altos costos de instalación.	Sensores nanoestructurados más económicos; integración IoT total; sistemas autónomos de autocorrección.

<b>Tecnología</b>	<b>Aplicación principal</b>	<b>Beneficios clave</b>	<b>Limitaciones actuales</b>	<b>Proyección futura (2030–2050)</b>
Nanotecnología aplicada	Mejora de compost, biofertilizantes, envases activos antimicrobianos, recuperación de nutrientes.	Aumenta la eficiencia de liberación de nutrientes; mejoras barreras antimicrobianas; incrementa productividad agrícola.	Riesgos toxicológicos; regulación limitada; infraestructura especializada.	Nanomateriales verdes; regulación internacional armonizada; sistemas agrícolas inteligentes con nanopartículas controladas.
IA generativa aplicada al compostaje y biorrefinería	Optimización de parámetros (temperatura, pH, humedad); predicción de madurez; diseño de procesos; generación de escenarios óptimos.	Reducción del tiempo de compostaje; mayor homogeneidad; análisis predictivo; automatización completa del proceso.	Dependencia de grandes volúmenes de datos; inversión tecnológica elevada; necesidad de personal capacitado.	Compostaje 100% automatizado; plantas inteligentes autosostenibles; IA integrada a microorganismos sintéticos diseñados digitalmente.

# BIBLIOGRAFIA

Aguiar, S., Enríquez Estrella, M., & Uvidia Cabadiana, H. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *AXIOMA*, 1 (27), 5-11.

Alcántara-Revilla, A. R., Mejía-Benavides, A., Chávez-García, S. C., & Castillo-Llerena, D. E. (2022). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su impacto en el medio ambiente. *Revista Científica OGOLL*, 2(2), e29. <https://doi.org/10.54655/ogoll.v2i2.29>

Álvarez Godoy, M., Chicaiza Toro, E., Nastacuas Pai, N., & Díaz Abahonza, E. H. (2023). *El compostaje y el manejo de los residuos sólidos orgánicos para mantener un entorno saludable en la Institución Educativa Técnica Agropecuaria Ambiental Bilingüe Inda Sabaleta*. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2). [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i2.5637](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5637)

Alvarado Pérez, Y. (2017). Aprovechamiento del suero lácteo para la obtención de péptidos antihipertensivos encapsulados en sistemas poliméricos biodegradables. *Instituto Tecnológico de Toluca*.

Alonso, N. B. (2019). Subproductos y fin de condición de residuos: elementos clave para una economía circular. *Medio Ambiente & Derecho: Revista electrónica de derecho ambiental*, (35), 7.

Amato, C. N., Buraschi, M., Peretti, M. F., & Gonzalez, S. D. L. D. (2024). Propuesta de metodología de análisis para cadenas de valor agroindustriales desde la perspectiva de la bioeconomía circular.

ALBA Group. (2022). *Circular economy and waste management in Europe*. Recuperado de <https://alba.info>

Alcántara-Revilla, A. R., et al. (2022). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su impacto en el medio ambiente. *Revista Científica OGOLL*.

Altomare, A., et al. (2012). Síntesis de acetato de n-butilo mediante destilación reactiva. *Chemical Engineering Journal*, 210, 45–52.

Altieri, M., & Nicholls, C. I. (2000). Teoría y práctica para una agricultura sustentable. Serie Textos Básicos para la Formación Ambiental. PNUMA. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe. México, 235.

Alvarado Carrasco, C., & Guerra, M. (2010). Lactosuero como fuente de péptidos bioactivos. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 23(1), 45-52.

Álvarez Godoy, A. M., & Rodríguez, J. L. (2007). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 31-45. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n1.003>

Alvarado Aguayo, A. A., & Abad Sánchez, M. L. (2018). *Aprovechamiento de vinaza para obtención de biofertilizantes como alternativa nutricional para el sector agropecuario*. DELOS: Desarrollo Local Sostenible, 11(33).

Alvarado, C., & Guerra, M. (2010). Lactosuero como fuente de péptidos bioactivos. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 23(1), 42-49.

Aponte, G. M. (2024). *Tendencias en la producción científica en el área de tecnologías digitales y economía circular*. Revista GPT.

Arvelález, J., et al. (2008). Extracción de aceite de almendra de corozo por arrastre con vapor y n-hexano. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 31(2), 115-122.

Asamblea Nacional. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Suplemento 983.

Asamblea Nacional. (2021). *Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva*. Registro Oficial Suplemento 488.

Asamblea Nacional. (2009). *Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria*. Registro Oficial Suplemento 583.

Asian Development Bank (ADB). (2023). *PPP strategies for waste-to-energy projects in Asia*. Recuperado de <https://adb.org>

ASYPS. (2025). *Indicadores y marcos de seguimiento de Economía Circular*. Asociación para la Sostenibilidad y el Progreso de las Sociedades.

Aznar-Ramos, K., et al. (2025). Polifenoles de la cáscara de mango – El método de extracción importa. *Hielscher Ultrasonics*.

Bacca Narváez, A. J., & España Muñoz, J. (2024). Revisión bibliográfica de metodologías para el aprovechamiento de residuos de frutas y verduras para la obtención de compuestos bioactivos y su uso en alimentos funcionales.

Bacca, J., & España, M. (2022). *Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular*. *Tecnológicas*, 25(54), Medellín. <https://doi.org/10.22430/22565337.2505>

Bandh, S. A., Malla, F. A., Wani, S. A., & Hoang, A. T. (2024). *Waste Management and Circular Economy*. SpringerLink.

Banco Mundial. (2021). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Group. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>

Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2023). *Alianzas público-privadas para infraestructura sostenible*. Recuperado de <https://publications.iadb.org>

Barragán Huerta, B. E., Téllez Díaz, Y. A., & Laguna Trinidad, A. (2008). Utilización de residuos agroindustriales. *Revista Sistemas Ambientales*, 2(1), 44–50. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/310441706>

Bernal Aldana, A. S. (2022). *Aplicaciones y tecnologías utilizadas para el aprovechamiento del suero lácteo*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Bohórquez, A., Puentes, Y., & Menjivar, J. C. (2014). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 45–58. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-87062014000100007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-87062014000100007)

Buenrostro-Figueroa, J. J., Chávez-González, M. L., Egbuchunam, T. O., Sepúlveda Torre, L., & Haghi, A. K. (Eds.). (2025). *Environmental Health Engineering and Effective Remediation: Sustainable Technology Products and Materials* (1st ed.). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003597544>

Buhigas, I. (2024). *La revolución de la Inteligencia Artificial en la optimización de procesos*. ApplidIT.

Buitrago, G., et al. (2008). Producción continua de proteína unicelular a partir de lactosuero. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 10(1), 45–52.

Bustos Vázquez, R. (2023). *Impacto transformador de la inteligencia artificial y aprendizaje autónomo en la producción agropecuaria: un enfoque en la sostenibilidad y eficiencia*. Formación Estratégica, 7(1). Recuperado de <https://www.formacionestrategica.com/index.php/foes/article/view/111>

Caballero, J. (2014). Diseño de proceso biotecnológico para producción de ácido láctico y bioetanol. *Universidad de Sevilla*.

Cañadas Soler, R. (2022). *Valorización de residuos agroindustriales mediante nuevos procesos sostenibles para la obtención de antioxidantes naturales* [Tesis doctoral, UPM]. <https://oa.upm.es/71730/>

CATSA. (2012). *La cachaza y su empleo como abono orgánico en plantaciones de caña de azúcar*. Central Azucarera Tempisque S.A.



Castells, X. E. (2012). *Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales: Reciclaje de residuos industriales*. Ediciones Díaz de Santos.

Castro-Quelal, L. R., Herrera-Tapia, E. H., & Castro-Quelal, D. A. (2024). Modelos de Negocios Circulares: Hacia una Economía Sostenible en el Sector Emprendedor. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(1), 122-148.

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

Cepeda-Tovar, C., et al. (2022). Desarrollo e importancia de películas biopoliméricas en alimentos. *Dialnet*.

China Domínguez, A. (2021). *Gestión de residuos SANDACH en industria cárnica*. Universidad de La Laguna.

Colobon Realpe, P. J. (2025). *Elaboración de abono orgánico tipo compost en la finca el paraíso del cantón Rioverde, provincia Esmeraldas, 2024* (Bachelor's thesis, Jipijapa-Unesum).

Constitución de la República del Ecuador [CRE]. Art. 14 y 66. (2008). Registro Oficial No. 449. Quito, Ecuador.

Código Orgánico del Ambiente [COA]. (2021). Registro Oficial Suplemento No. 983. Quito, Ecuador.

Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización [COOTAD]. (2010). Registro Oficial Suplemento No. 303. Quito, Ecuador.

Córdova Garofalo, R. J. (2025). Uso de residuos y subproductos de plantas agroindustriales para generar energía y fertilizantes en el Ecuador (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Babahoyo).

Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. (2018). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente*. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1), 3–20. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>

Cornejo Ramírez, J. B. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como estrategia de gestión ambiental. En Alcántara-Revilla, A. R., Mejía-Benavides, A., Chávez-García, S. C., & Castillo-Llerena, D. E. (2022). *Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su impacto en el medio ambiente*. *Revista Científica OGOLL*, 2(2), e29. <https://doi.org/10.54655/ogoll.v2i2.29>

Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1), 59-72.

De la Vega Marzari, F. M. (2025). Evaluación de alternativas de compostaje de residuos agropecuarios y agroindustriales. *Universidad Nacional de Cuyo*. [https://bdigital.uncuyo.edu.ar/objetos\\_digitales/20949/evaluacin-de-alternativas-de-compostaje.pdf](https://bdigital.uncuyo.edu.ar/objetos_digitales/20949/evaluacin-de-alternativas-de-compostaje.pdf)

Enríquez-Estrella, M., Quevedo-Escobar, H., & Bravo, B. G. (2022). Evaluación del aprovechamiento de residuos sólidos ganaderos para producir biogás y abonos en la comunidad El Calvario, Provincia de Pastaza, Ecuador: Evaluation of livestock solid waste use to produce biomass and manure in El Calvario community, Pastaza Cantón, Ecuador. *Revista Estudios Ambientales-Environmental Studies Journal*, 10(1), 18-34.

Enriquez-Estrella, M., Arboleda-Alvarez, L., Ricaurte-Órtiz, P., El Salous, A., & Andrade-Alban, M. J. (2019). Sustainable Utilization of Agro-Industrial Fruit and Vegetable Waste in Industry: Potential for the Production of Bioactives and Biomaterials: Aprovechamiento sostenible de residuos agroindustriales de frutas y vegetales en la industria: potencial para producir bioactivos y biomateriales. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*.

Enríquez, M., Serrano, G., Cuadrado, D., & Ricaurte, P. (2024). Efecto de los aceites esenciales de plantas aromáticas en la conservación de embutidos. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 29(1), 196-225.

Estrella, M. Á. E. (2022). Diseño de un biodigestor de excretas animales en la comunidad El Calvario, parroquia Veracruz, cantón Pastaza, Ecuador. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 34(4), 28-43.

Enríquez Estrella, M. A. (2018). Atmósfera modificada en la conservación de carne de trucha arcoiris (*oncorhynchus mykiss*). *Revista Digital Novasinergia*, 1(1), 67-71.

EUR-Lex. (2008). *Directiva 2008/98/CE sobre los residuos*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>

EUR-Lex. (2018). *Directiva (UE) 2018/851*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj/eng>

EUR-Lex. (2018b). *Directiva (UE) 2018/850*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32018L0850>

EUR-Lex. (2025). *Reglamento (UE) 2025/40 sobre envases y residuos de envases*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2025/40/oj/eng>

Environment. (2024). *Industrial and Livestock Rearing Emissions Directive (IED 2.0)*. [https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-and-livestock-rearing-emissions-directive-ied-20\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-and-livestock-rearing-emissions-directive-ied-20_en)

FAO. (2013). *Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/4/i3388s/i3388s.pdf>

Fernández Lorenzo, P. (2019). *Evaluación de alternativas para valorización de residuos en empresa cárnica*. Universidad de León.

Fernández Lobato, M. (2022). *Valorización de residuos de aceite de oliva: análisis de ciclo de vida*. Universidad de Jaén.

García, L. (2023). *Caracterización del mucílago de cacao como fuente de pectina y azúcares* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co>

García, M. (2020). Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular. *TecnoLógicas*, 25(54), I-IV. <https://doi.org/10.22430/22565337.2505>

Gobierno de México. (2023). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*. <https://www.gob.mx/semarnat>

González Salcedo, L. O. (2021). *Alternativas de aprovechamiento de los residuos en la agroindustria*. Editorial Académica Española.

Granda-Restrepo, D. M., et al. (2014). Desarrollo y caracterización de una película activa biodegradable con antioxidantes a partir de proteínas del lactosuero. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(2), 7285-7294.

Grande Tovar, C. (2020). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales*. Biocombustibles. Editorial Universidad San Buenaventura.

Grande Tovar, C. (2023). *La confluencia de Bioeconomía Circular, Biorrefinerías y Objetivos de Desarrollo Sostenible en el sector del olivar*. C3-BIOECONOMY: Circular and Sustainable Bioeconomy, (4), 95–112. <https://doi.org/10.21071/c3b.vi4.16558>

Guerrero, J., & Valenzuela, M. (2011). Contaminación ambiental por residuos agroindustriales. En A. Cury et al. (Eds.), *Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento*. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 9(1), 45–58. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>

Gutiérrez-González, L. S., Ojeda-Barrios, D. L., Ávila-Quezada, G. D., & Hernández-Rodríguez, O. A. (2024). Características cambiantes durante el compostaje y valores indicativos de calidad en el producto final. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 40(2), 39–52. <https://doi.org/10.29393/chjaas40-39cfo40039>

Hernández, J., Quinto, P., Aguilar, J. O., Arjona, M., & Becerra, N. G. (2022). *Análisis del secado de productos agrícolas*. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 23(2). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81373798004>

Hernández, L. (2022). *Propuesta para la gestión de residuos cárnicos en carnicerías y supermercados*. Universidad Técnica de Ambato.

Hernández Melchor, G. I., Salgado García, S., Palma López, D. J., Lagunes Espinoza, L. C., Castelán Estrada, M., & Ruiz Rosado, O. (2008). *Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un gleysol mólico de Chiapas, México*. *Interciencia*, 33(11), 850–856.

Hernández, J., et al. (2006). Compostaje de subproductos de palma aceitera con estiércol bovino. *Revista Científica UDO Agrícola*, 6(1), 45–52.

Herrera Cárdenas, J. A., & Gallardo, J. F. (2022). El compostaje como alternativa de manejo de residuos sólidos orgánicos: procesos y parámetros de calidad del producto final. *Revista UTIM*, 8(2), 15–28. <https://mixtec.utim.edu.mx/articulosv3/articulo08.pdf>

Hidalgo-Barrio, M., et al. (2014). Digestión anaerobia en dos fases de residuos oleosos con purín porcino. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 89–98.

Huamani Cordova, R. (2023). *Producción de biodiésel a partir de aceite reciclado y grasa de pollo*. Universidad Peruana Unión.

Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2013). *NTE INEN 2266: Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos. Requisitos* (2ª ed.). Quito, Ecuador. Recuperado de <https://gptsachila.gob.ec/estudioambiental2/documentos/Biblioteca/Normativa%20Ambiental/NTE-INEN-2266-Transporte-almacenamiento-y-manejo-de-materiales-peligrosos.pdf>

JAIIO. (2025). *Gestión integral sostenible de residuos agroindustriales*. Revista de la Universidad Nacional de La Plata. Recuperado de <https://revistas.unlp.edu.ar/JAIIO>

Jacobo Marroquín, J. R., & García Barrera, A. V. (2024). *Aprovechamiento del lactosuero para el desarrollo de productos innovadores para el sector alimentos y la agroindustria*. ITCA-FEPADE

Khan, I. A., Haq, F., Kiran, M., & Aziz, T. (2025). *Circular economy and waste management: transforming waste into resources for a sustainable future*. *International Journal of Environmental Science and Technology*.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions*. *Resources, Conservation and Recycling*.

Kulakovskaya, A., Knoeri, C., Radke, F., & Blum, N. U. (2022). *Measuring the Economic Impacts of a Circular Economy: an Evaluation of Indicators*. *Circular Economy and Sustainability*.

López, J. (2023). *Producción de biopelícula a partir de pectinas extraídas del mucílago de café* (Proyecto integral de grado). Universidad de América. Recuperado de <https://repository.uamerica.edu.co>

López, J. (2021). *Compostaje de cartílagos y tendones para producción de biofertilizantes*. Universidad de Sevilla.

Madera-Santana, T. J., Rodríguez-Núñez, J. R., Barreras-Urbina, C. G., López-Martínez, L. X., & Fortiz-Hernández, J. (2023). *Extracción de compuestos bioactivos de residuos agroindustriales empleando extracción asistida por ultrasonido y microondas*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/375117762>

Manglai.io. (2024). *Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE*. <https://www.manglai.io/glossary/directiva-marco-residuos-2008-98-ce>

Marcano, A., et al. (2014). Obtención de biodiésel a partir de aceites residuales de cocina. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 37(1), 23–30.

Martínez Rodríguez, A. P., De Paula, C. D., & Simanca Sotelo, M. M. (2013). Bebida láctea fermentada a partir de suero de quesería con adición de pulpa de maracuyá. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 36(3), 203-209.

Martín-Marroquín, J., et al. (2018). *Valorización de residuos agroalimentarios y aceites mediante digestión anaerobia*. Universidad de Valladolid.

Márquez, E., et al. (2008). Estabilidad de productos cárnicos reestructurados con plasma bovino. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(1), 45–52.

Ministerio del Ambiente. (2003). *Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de Desechos Sólidos No Peligrosos*. Decreto Ejecutivo N° 3516.

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2003). *Acuerdo Ministerial N° 177: Reglamento de la Producción Orgánica Agropecuaria*.

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2022). *Pacto Nacional por el Reciclaje Inclusivo*.

Ministerio del Ambiente. (2008). *Acuerdo Ministerial No. 026: Registro de generadores de desechos peligrosos*. Registro Oficial No. 334.

Ministerio del Ambiente. (2012). *Acuerdo Ministerial No. 142: Listado nacional de sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos y especiales*. Registro Oficial No. 856.

Ministerio del Ambiente. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 061: Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria*. Registro Oficial No. 316.

Molina-Morejón, V. M., Espinoza-Arellano, J. J., Contreras-Martínez, J. G., & Díaz-Gurrola, E. R. (2025). *Gestión de residuos agroindustriales: un enfoque de bioeconomía circular*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(6). <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i6.3792>

Muñoz Arias, N. E. (2025). *Uso de biofertilizantes en la producción de hortalizas* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2025).

Ojeda Arias, C. (2021). *Procesos para valorización de aceite vegetal usado*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Padín, A., & Díaz, M. (2009). Producción de etanol a partir de lactosuero mediante fermentación alcohólica extractiva. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 10(2), 123-130.

Pagés-Díaz, J., Cabrera Contreras, L., Cabrera Díaz, A., & Pereda Reyes, I. (2019). *Biodegradabilidad de residuos de la industria agro-azucarera cubana: co-digestión anaerobia*. Centro Azúcar, 46(3), 79–88.

Palazzolo, G., Sanfelice, R. C., Pavinatto, A., & Corrêa, D. S. (2022). *Nanotecnología aplicada a polímeros*. São Paulo: Blucher. ISBN: 978-65-5550-252-7. Recuperado de <https://openaccess.blucher.com.br/download-pdf/55/860>

Palomino Ávila, K. S., Pérez Ávila, M. Y., & Zambrano Luna, A. V. (2024). *Evaluación de la tendencia actual de modelos de economía circular a nivel mundial para proponer una estrategia de sostenibilidad en el sector de producción de alimentos en Colombia*. ResearchGate.

Pardo Díaz, S., Suárez Estrada, M., Camelo Rusinque, M., Rojas Tapias, D., & Estrada Bonilla, G. (2021). *Guía de compostaje para agricultores*. AGROSAVIA. <https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/download/441/547/2540-1?inline=1>

Paredes, M. (2024). Efecto de mucilago de cacao y café en bebidas energéticas. *Revista Agrotecnológica Amazónica*. Recuperado de <https://www.researchgate.net>

Pérez Martínez, J. (2021). *Economía Circular: un modelo sostenible para el desarrollo del Sector Agropecuario*. Dialnet.

Pozo, J. (2017). *Extracción de ceras a partir de cachaza en ingenios azucareros de Bolivia*. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Preciado-Saldaña, A. M., Ruiz-Canizales, J., Villegas-Ochoa, M. A., et al. (2022). *Aprovechamiento de subproductos de la industria agroalimentaria: un acercamiento a la economía circular*. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2022). *Perspectiva del medio ambiente mundial – GEO-6*. <https://www.unep.org/es/resources/report/perspectiva-del-medio-ambiente-mundial-geo-6>

Raimondo, E. E., Colombo, M., Salinas, B., et al. (2023). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la elaboración de un biofertilizante. *Libro de resúmenes del 1º Congreso Nacional de Alimentos, Salud y Ambiente*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/217568>

Ramírez Bayas, J. A. (2012). Innovación tecnológica en la valorización de residuos agroindustriales. En Alcántara-Revilla, A. R., Mejía-Benavides, A., Chávez-García, S. C., & Castillo-Llerena, D. E. (2022). *Aprovechamiento de los residuos agroindustriales*

y su impacto en el medio ambiente. *Revista Científica OGOLL*, 2(2), e29. <https://doi.org/10.54655/ogoll.v2i2.29>

Ramos, C. (2023). *Fenoles y capacidad antioxidante en infusiones de cascarilla de cacao* (Tesis). Universidad Nacional Agraria de la Selva. Recuperado de <https://repositorio.unas.edu.pe>

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. (2025). *Gestión de residuos agroindustriales: un enfoque de bioeconomía circular*. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx>

Reciclaje y Gestión. (2023). *Normatividad aplicable al tema de residuos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>

Recycling Today. (2023). *Global recycling trends and extended producer responsibility policies*. <https://www.recyclingtoday.com/>

Resano, D., Guillen, O. W., Ubillús, F. D. R., & Barranzuela, J. L. (2022). *Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción*. *Información Tecnológica*, 33(2). [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642022000200247](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642022000200247)

Rodríguez, L. (2023). Análisis de alternativas sostenibles para el aprovechamiento industrial del suero lácteo. *Universidad Santo Tomás*.

Romero-Sáez, M. L. F., & López Romero, J. C. (2023). *Extracción de compuestos bioactivos de residuos agroindustriales*. *Hablemos Claro*. Recuperado de <https://hablemosclaro.org/extraccion-de-compuestos-bioactivos-de-residuos-agroindustriales/>

Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019). *A taxonomy of circular economy indicators*. *Journal of Cleaner Production*.

Salazar, J. (2023). Propiedades fisicoquímicas y actividad antioxidante del aceite esencial de Citrus jambhiri. *Revista de la Sociedad Química del Perú*.

Salazar, M., & Lema, J. (2023). Aprovechamiento del suero lácteo para la producción de ácido láctico. *Universidad Nacional de Chimborazo*.

Salgado-Tello, I., Sánchez-Herrera, T., Oleas-López, J., & Vaca-Cardenas, M. (2024). *Economía circular para el desarrollo agroindustrial y social en Ecuador*. Telos.

Salinas-Flores, A., et al. (2019). Efecto de las condiciones de extracción sobre la capacidad antioxidante de compuestos fenólicos de cáscara de granada. *Mexican Journal of Biotechnology*, 4(2), 33–46.

Sarango, A. F. H., Lescano, J. C. P., Sánchez, P. V. M., Barragán, C. E. C., & Velasco, J. E. L. (2024). *Economía Circular: Modelos de Negocio y Estrategias Sostenibles*. Know Press.

Saudi Vision 2030. (2023). *National sustainability strategy*. Recuperado de <https://vision2030.gov.sa>

Schachenmayr, M. (2019). Digestión anaerobia del lactosuero para producción de biogás y biofertilizantes. *Universidad Nacional del Sur*.

Saval S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *Bio-Tecnología*, 16(2):14-16.

Senatore, D., Queirolo, A., Wajswol, S., & Bajsa, N. (2017). *Monitoreo de la aplicación de vinaza como fertilizante en caña de azúcar con indicadores microbianos de suelo*. INNOTEC, 13, 92–97.

Silva, R. (2020). *Valorización de plumas de aves para obtención de queratina hidrolizada*. Universidad Federal de Paraná.

Surco-Laos, F., et al. (2020). Determinación de polifenoles totales y actividad antioxidante de extracto de semillas de uvas. *SciELO Perú*.

SWITCH-Asia. (2023). *Public-private partnerships for green solutions*. Recuperado de <https://switch-asia.eu>

Tamayo Ortiz, C. V., & Alegre Orihuela, J. C. (2022). Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Siembra*, 9(1).

TecnoLógicas. (2022). *Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular*. Recuperado de <http://scielo.org.co>

TechBioTrends. (2023, septiembre 26). *El proceso biotecnológico que permite aprovechar integralmente residuos agroindustriales*. <https://techbiotrends.com/biotecnologia/el-proceso-biotecnologico-que-permite-aprovechar-integralmente-residuos-agroindustriales/>

Torres Ulloa, J. (2019). *Aprovechamiento de aceite usado en Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.

Torres, A. (2022). *Aprovechamiento de cascarilla de cacao como sustituto parcial de harina en brownies* (Trabajo de grado). Universidad de San Buenaventura. Recuperado de <https://bibliotecadigital.usb.edu.co>

Torres, M. (2018). *Extracción de gelatina y colágeno a partir de huesos y cartílagos bovinos*. Universidad Autónoma de México.

UAE Net Zero. (2023). *Climate neutrality and circular economy initiatives*. Recuperado de <https://uaenetzzero2050.ae>



Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. (2017). *Plan de gestión para los residuos sólidos industriales aplicando ISO 14001* [Tesis de licenciatura]. Recuperado de <https://tesis.usat.edu.pe>

Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión (UNJFSC). (2022). *Implementación del sistema de gestión ambiental en la empresa Agroindustrial Agrokasa S.A.C.* [Tesis de licenciatura]. Recuperado de <https://repositorio.unjfsc.edu.pe>

UNOPS. (2023). *Public-private partnerships for sustainable development*. Recuperado de <https://unops.org>

Van Hoof, B., Núñez, G., & de Miguel, C. (2022). *Metodología para la evaluación de avances en la economía circular en los sectores productivos de América Latina y el Caribe*. CEPAL.

Vela-Gutiérrez, G. (2020). *Suero de leche: impacto nutricional, tecnologías de procesamiento, evaluación sensorial e innovación gastronómica*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

Vera Dueñas, M. O., Romero Moreira, A. J., Zambrano Zambrano, G. A., et al. (2024). *El bagazo de la caña de azúcar como sustrato en la fermentación láctica*. *Avances en Química*, 19(1), 27–36. <https://repositorio.iniap.gob.ec>

Villegas Cárdenaz, J. (2011). *Aprovechamiento de residuos cárnicos mediante digestión anaerobia para producción de biogás y biofertilizantes*. Universidad Nacional de Colombia.

Visentín, A. N., Drago, S. R., Osella, C. A., Sánchez, H. D., & González, R. J. (2009). Efecto de la adición de harina de soja y concentrado proteico de suero de queso sobre la calidad del pan y la dializabilidad de minerales. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 59(3), 276-283.

Waste Cero. (2025). *Trazabilidad de residuos: qué es, por qué importa y cómo empezar*. Recuperado de <https://www.wastecero.com>

Zamudio Castellanos, J. (2014). *Aplicaciones de las biopelículas comestibles en la industria alimenticia*. *Universidad del Valle*.

## SOBRE OS AUTORES



**Miguel Ángel Enríquez Estrella:** Ingeniero Agroindustrial. Diploma Superior en Proyectos y Transferencia de Tecnologías. Magister en Gestión de la Producción Agroindustrial. Magister en Agroindustria mención Sistemas Agroindustriales. Doctorado en Ingeniería de Productos y Procesos de la Industria Alimentaria (Cursando). Universidad Estatal Amazónica. Puyo – Ecuador.  
<https://orcid.org/0000-0002-8937-9664>



**Hernán Patricio Ruiz Mármol:** Ingeniería en Industrias Pecuarias. Magister en Industrias Pecuarias mención Industrias de la Carne. Doctor en Ingeniería Industrial. Universidad Estatal Amazónica. Puyo – Ecuador.  
<https://orcid.org/0000-0002-2759-641X>



**Edwin Fernando Basantes Basantes:** Bioquímico Farmacéutico. Magister en Toxicología Industrial y Ambiental. Master Universitario en Ciencias y Tecnología Química Especialidad en Química Analítica. Magister en Sistemas de Gestión de Calidad. Universidad Estatal Amazónica - Puyo.  
<https://orcid.org/0000-0002-2262-0222>



**David Sancho Aguilera:** Doctor en Medicina Veterinaria. Especialista en Diseño Curricular. Diploma en Gestión Prospectiva de la Educación. Master en Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Magister en Gestión de la Educación Superior mención en Educación Superior. Doctorado en Ciencias de los Alimentos. Universidad Estatal Amazónica – Puyo. <https://orcid.org/0000-0001-5625-4198>

