GRUPO BLR

BIOECONOMÍA CIRCULAR: TRANSICIÓN HACIA LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL, ENERGÉTICA Y SOCIAL

ISBN: 978-9907-802-25-2

Hugo Ítalo Romero Bonilla
Jonathan Josué Echeverría Gía
Lenny Alexia Maldonado Delgado

2026

BIOECONOMÍA CIRCULAR: TRANSICIÓN HACIA LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL, ENERGÉTICA Y SOCIAL

Hugo Ítalo Romero Bonilla

Jonathan Josué Echeverría Gía

Lenny Alexia Maldonado Delgado

AUTORES

UTMACH

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Técnica de Machala
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupoblr.com
https://grupoblr.com/libros-investigo
REPOSITORIO



Romero, H., Echeverría, J., Maldonado, L. (2026) Bioeconomía circular: Transición hacia la sostenibilidad ambiental, energética y social. Grupo Editorial BLR.

© Hugo Ítalo Romero Bonilla
Jonathan Josué Echeverría Gía
Lenny Alexia Maldonado Delgado

Bioeconomía circular: Transición hacia la sostenibilidad ambiental, energética y social.

ISBN: 978-9907-802-25-2

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

Filiación de los autores

Hugo Ítalo Romero Bonilla

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: hromero@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7846-0512

Jonathan Josue Echeverria Gia

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: jecheverr7@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1935-4849

Lenny Alexia Maldonado Delgado

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: lmaldond9@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9371-0969

PREFACIO

En estos tiempos de cambio e incertidumbre, hablar de sostenibilidad ya no es una simple aspiración, sino una responsabilidad compartida entre los gobiernos, las universidades y el sector empresarial, tal como se gestiona en Europa, Estados Unidos, China y otros países desarrollados. La forma en que producimos nuestros alimentos, aprovechamos los recursos naturales y organizamos nuestras economías requiere una transformación profunda y urgente. La idea de este libro, nace a partir de la crisis energética ecuatoriana del último trimestre del 2024 y también desde una esperanza apostando a la innovación, el desarrollo tecnológico y la responsabilidad social universitaria que las instituciones de educación superior deben emprender en este tema.

La bioeconomía circular, más que una moda o una etiqueta, representa una alternativa real frente al modelo extractivo que ha predominado por décadas. Aquí no se trata solo de reducir residuos o de hacer más eficiente el uso de los recursos, sino de repensar cómo nos relacionamos con la naturaleza, con nuestros territorios y entre nosotros. Este libro busca justamente eso: ofrecer herramientas, ejemplos y reflexiones para construir economías regenerativas, políticas públicas con sentido territorial y humano con enfoque en la sostenibilidad energética y la valorización económica de la biomasa.

A lo largo de los capítulos, abordamos esta temática desde distintos ángulos. Partimos de las bases conceptuales de la bioeconomía y la economía circular, para luego adentrarnos en conceptos de química verde, agricultura sostenible, estudios de caso y experiencias concretas

en países desarrollados. También incluimos herramientas prácticas como las aplicaciones de la conversión termoquímica y otras formas innovadoras de aprovechar los residuos en territorios rurales y agroindustriales.

Este libro no pretende ser una fórmula cerrada ni un recetario. Más bien, es una invitación a pensar y actuar desde lo local, con una mirada crítica pero constructiva, entendiendo que cada territorio tiene sus propias dinámicas, desafíos y potencialidades. Quienes colaboramos en esta obra, docente y estudiantes de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Técnica de Machala, creemos firmemente en el valor del conocimiento compartido, en el diálogo entre ciencia y comunidad, y en la necesidad de construir soluciones que sean no solo técnicamente viables, sino también culturalmente apropiadas y socialmente justas.

Dirigido a estudiantes, profesionales, investigadores, técnicos, autoridades de gobiernos autónomos descentralizados y agentes del cambio, este libro espera contribuir, a la tarea colectiva de valorizar los residuos para transitar hacia un modelo de desarrollo energéticamente sostenible, más digno, más consciente y más resiliente con el cambio climático y el calentamiento global.

Hugo Romero Bonilla. PhD.

ÍNDICE

PREFACIO……...i

INTRODUCCIÓN xii

ÍNDICE DE TABLAS xv

ÍNDICE DE FIGURAS xvi

CAPÍTULO I 20

1. INTRODUCCIÓN A LA BIOECONOMÍA CIRCULAR 20

CAPÍTULO II 38

2. SINERGÍAS ENTRE QUÍMICA ANALÍTICA Y QUÍMICA VERDE 38

CAPÍTULO III 46

3. NITRÓGENO 46

3.1 El nitrógeno y sus métodos convencionales de obtención 46

3.1.1 Proceso Haber-Bosch.....48

3.2 El nitrógeno en la agricultura 51

3.3 El nitrógeno como contaminante.....53

3.4 Residuos orgánicos como fuente de nitrógeno verde 55

3.5 Recuperación de nitrógeno a partir de lodos residuales 59

3.5.1 Precipitación de estruvita.....60

3.5.2 Cultivos de microalgas 61

3.6 Valorización de proceso de obtención de urea a partir de amoniaco……..62

3.6.1 Recuperación de amoniaco 62

3.6.2 Síntesis de urea 63

CAPÍTULO IV.....65

4. HIDRÓGENO.....65

4.1 Definición de hidrógeno 65

4.2 Hidrógeno verde 66

4.3 Hidrógeno azul 70

4.4 Hidrógeno gris 71

4.5 Hidrógeno a partir de metano.....72

4.5.1 Reformado de metano con vapor.....72

4.5.2 Oxidación parcial.....74

4.5.3 Reformado autotérmico 74

4.5.4 Reformado con dióxido de carbono (Dry Reforming) o reformado seco de metano.....76

4.5.5 Reformado seco y húmedo 77

4.5.6 Steam iron 78

4.6 Hidrógeno a partir de biomasa 81

4.6.1 Gasificación de la biomasa 82

4.6.2 Pirólisis y obtención de hidrógeno 83

4.6.3 Fotofermentación 85

4.6.4 Acerca de los costos de producción de hidrógeno verde y azul……...87

4.7 Demanda del hidrógeno 88

4.7.1 Demanda mundial de hidrógeno 88

4.7.2 Demanda mundial de biohidrógeno 90

4.7.3 Demanda europea de biohidrógeno 91

4.7.4 Demanda asiática de biohidrógeno 92

4.7.5 Demanda sudamericana de biohidrógeno 92

4.7.6 Demanda ecuatoriana de biohidrógeno.....92

CAPÍTULO V 94

5. BIOETANOL.....94

5.1 Generaciones del bioetanol.....96

5.1.1 Primera generación 96

5.1.2 Segunda generación 96

5.1.3 Tercera generación.....97

5.1.4 Cuarta generación 98

5.2 Materias primas y métodos de producción 99

5.2.1 Cultivos ricos en azúcares 100

5.2.2 Cultivos ricos en almidón 100

5.2.3 Biomasa lignocelulósica 100

5.2.4 Proceso de producción 101

5.3 Costos de producción y valorización de biorresiduos en la producción de bioetanol.....103

5.3.1 Costos según el tipo de materia prima 103

5.3.2 Costos de insumos y procesos 104

5.3.3 Valorización de biorresiduos en la producción de bioetanol.105

5.3.4 Rendimiento de bioetanol según tipo de biomasa 105

5.3.5 Subproductos y beneficios adicionales 106

5.4 Ventajas, desventajas, eficiencia y producción de bioetanol.....106

5.4.1 Ventajas 107

5.4.2 Desventajas 109

5.4.3 Proceso de conversión 111

5.4.4 Eficiencia y producción 112

5.5 Aplicaciones del bioetanol 113

5.5.1 Combustible para el transporte 113

5.5.2 Generación de energía eléctrica y térmica 114

5.5.3 Materia prima en la industria química 115

5.5.4 Producción de bioplásticos y biopolímeros 115

5.5.5 Industria aeronáutica y marítima 116

5.5.6 Calefacción y cocinas domésticas 116

5.6 Reacciones para la obtención de bioplásticos a partir de bioetanol 117

5.7 Desafíos en la producción de bioetanol 120

5.7.1 Competencia con cultivos alimentarios 121

5.7.2 Eficiencia energética y costos 122

5.7.3 Impacto ambiental 123

5.8 Perspectivas futuras y desarrollo tecnológico 124

5.8.1 Optimización de microorganismos 124

5.8.2 Procesos híbridos 126

5.8.3 Expansión de mercados y estrategias de seguridad energética……...127

5.9 Biocombustibles y productos derivados del Bioetanol.....127

5.9.1 E5 128

5.9.2 E10 128

5.9.3 E85 129

5.9.4 E95 y E100 130

5.9.5 E-Diésel 130

5.9.6 ETBE (Etil-ter-butil-éter) 131

5.10 Ejemplos de producción de bioetanol 131

5.10.1 Bioetanol a partir de almidón de microalgas 131

5.10.2 Producción de bioetanol a partir de biomasa de macroalgas…….133

5.10.3 Obtención de bioetanol a partir de banano de rechazo 135

5.10.4 Producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos vegetales…….137

CAPÍTULO VI.....141

6. PROCESOS TERMOQUÍMICOS PARA LA UTILIZACIÓN DE BIOMASA 141

6.1 Combustión directa 142

6.2 Pirólisis 142

6.2.1 Pirólisis de compuestos lignocelulósicos 144

6.2.2 Reactores pirolíticos 145

6.2.3 Tipos de pirólisis 145

CAPÍTULO VII 149

7. PROCESOS MODERNOS DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL CON BIOCATALIZADORES 149

CAPÍTULO VIII 157

8. PROCESOS DE TORREFACCIÓN 157

8.1 Planta de torrefacción 165

8.1.1 Torrefacción en seco 170

8.1.2 Torrefacción húmeda 172

8.1.3 Torrefacción con vapor 173

8.2 Reactores utilizados para torrefacción 175

8.3 Estudios recientes sobre la torrefacción de biomasa 184

8.3.1 Torrefacción de cáscara de coco para la obtención de biocombustibles en Colombia 184

8.3.2 Torrefacción húmeda de cáscara de cacao en Ecuador.....185

8.3.3 Optimización de la torrefacción húmeda con zeolitas en Eslovenia 187

8.4 Aplicaciones industriales y ambientales de la biomasa torrefacta……189

CAPÍTULO IX.....192

9. PAPEL DEL REFORMADO Y LAS MICROALGAS DENTRO DE LA BIOECONOMÍA CIRCULAR, AVANCES..192

9.1 Reformado 193

9.1.1 Tipos de reformado.....195

9.1.2 Reformado de biomasa para hidrógeno verde 198

9.2 Compuestos orgánicos volátiles (VOCs).....204

9.3 Microalgas 207

9.3.1 Importancia de los fotobiorreactores en la producción de microalgas.....208

9.3.2 El papel de la inteligencia artificial en el biodiésel de microalgas……..211

9.3.3 Microalgas una alternativa para bioestimulantes agrícolas ...212

9.3.4 Microalgas una alternativa sostenible para la producción de biocombustibles 212

9.3.5 Estudios recientes sobre microalgas para biocombustibles y bioestimulantes 213

9.4 Revistas científicas y avances en la bioeconomía circular 220

9.4.1 Journal of Cleaner Production 221

9.4.2 Resources, Conservation and Recycling 221

9.4.3 Next Sustainability 221

9.4.4 Journal of Industrial Ecology 222

CONCLUSIONES 223

GLOSARIO 225

BIBLIOGRAFÍA 230

INTRODUCCIÓN

Frente a los desafíos globales del cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la presión sobre los recursos naturales, la bioeconomía circular emerge como una estrategia transformadora que impulsa el desarrollo sostenible mediante el aprovechamiento eficiente de la biomasa y los residuos orgánicos. Esta visión propone la transición hacia sistemas productivos regenerativos, que minimicen el uso de recursos fósiles, cierren ciclos de materiales y fomenten la innovación sustentada en principios de equidad ambiental y social. En este contexto, tecnologías avanzadas como química verde, microalgas como estimulantes de suelo, hidrógeno verde, nitrógeno verde, bioetanol, conversión termoquímica de biomasa (incluyendo pirolisis, gasificación, reformado y *steam iron*) y los procesos biotecnológicos para la producción de biohidrógeno a partir de residuos, constituyen pilares clave de esta nueva economía basada en el conocimiento biológico y la circularidad.

La química verde, como enfoque transversal, promueve procesos limpios, seguros y eficientes, evitando sustancias tóxicas y residuos peligrosos. Este principio impulsa el rediseño de cadenas productivas más sostenibles, facilitando la valorización de biomasa residual en productos bio-basados con alto valor agregado. Complementariamente, el hidrógeno verde, generado a partir de electrólisis con fuentes renovables, representa un vector energético crítico para descarbonizar sectores intensivos en emisiones, como la industria y el transporte.

Una variante de gran relevancia para países con alto potencial en biomasa, como Ecuador, es el biohidrógeno, producido mediante procesos biotecnológicos que transforman residuos orgánicos (agrícolas, agroindustriales o urbanos, rellenos sanitarios) en hidrógeno limpio. Este proceso, que incluye tecnologías como la fermentación oscura y la fotofermentación, no solo aprovecha recursos subutilizados, sino que abre oportunidades para descentralizar la producción energética, reducir la dependencia de combustibles importados y generar empleo en territorios rurales. El biohidrógeno representa, por tanto, una vía estratégica para fortalecer la soberanía energética y la competitividad industrial del país en el marco de una economía baja en carbono.

Asimismo, el nitrógeno verde, obtenido con fuentes de energía renovable, tiene un papel crucial en la producción de fertilizantes sostenibles, contribuyendo a cerrar el ciclo de nutrientes y reduciendo el impacto ambiental de la agricultura intensiva. Por su parte, el bioetanol y el biodiesel, obtenidos a partir de residuos agrícolas y agroindustriales, ofrecen soluciones inmediatas para reducir las emisiones del parque automotor, mientras que la conversión termoquímica de biomasa, a través de técnicas como la pirolisis, gasificación, reformado y steam iron, permite mediante biorefinerías, transformar residuos lignocelulósicos en biocombustibles, gases renovables y compuestos químicos.

Estos desarrollos no solo son tecnológicos, sino estructurales: permiten redefinir los sistemas económicos hacia modelos más resilientes, inclusivos y sostenibles. En el caso de Ecuador, un país

megadiverso con una alta disponibilidad de residuos agroindustriales, forestales y urbanos, la implementación de estos enfoques representa una gran oportunidad para dinamizar la bioeconomía nacional, impulsar la innovación tecnológica, fortalecer las cadenas de valor rurales y cumplir con los compromisos climáticos internacionales.

La bioeconomía circular, con base en políticas públicas, el aprovechamiento integral de la biomasa y la innovación biotecnológica, no es únicamente una alternativa ambiental; es una estrategia de desarrollo que responde a las realidades territoriales, fortalece la economía local y construye soberanía tecnológica. Integrar estos ejes temáticos no solo es una respuesta a la crisis ambiental, sino también una apuesta por un futuro más justo, regenerativo y autónomo para Ecuador y el mundo.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnologías de hidrógeno verde, principales características ambientales.....67
Tabla 2. Comparación de los tipos de electrólisis para la producción de hidrógeno.....69
Tabla 3. Costos de producción de hidrógeno verde y azul mediante sus procesos. 88
Tabla 4. Demanda y Proyección del Hidrógeno verde (2021 - 2030) por regiones. 93
Tabla 5. Diferentes materias primas para la obtención de bioetanol y su producción potencial.....100
Tabla 6. Rendimientos típicos de productos (base madera seca) obtenidos por los diferentes modos de pirólisis de la madera. 147
Tabla 7. Descripciones de un sistema de reacción de torrefacción. 167
Tabla 8. Comparación de la torrefacción no oxidativa y oxidativa. 171
Tabla 9. Comparación de torrefacción seca, húmeda y con vapor. 174
Tabla 10. Modelos de reactores para torrefacción.....176
Tabla 11. Costos directos de producción.....181
Tabla 12. Ingreso por ventas de biocarbón.....182

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Biorrefinería para lograr una bioeconomía circular en España. 20
Figura 2. Biorrefinería de PERSEO Biotechnology. 22
Figura 3. Biocarbón a partir de biomasa doméstica. 26
Figura 4. Lixiviados ricos en aminoácidos. 32
Figura 5. Residuos bananeros, raquis de banano. 33
Figura 6. Residuos camaroneros, cáscara de camarón. 34
Figura 7. Química verde y un futuro más limpio. 41
Figura 8. Estación de compresión con generador de nitrógeno. ...47
Figura 9. Diagrama de proceso Haber-Bosch. 50
Figura 10. El nitrógeno en el medio ambiente. 51
Figura 11. El nitrógeno en la agricultura. 52
Figura 12. Eutrofización y contaminación del agua. 54
Figura 13. El quitosano y sus fuentes de obtención. 56
Figura 14. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba, Cuenca, Ecuador. 59
Figura 15. Principales formas de producción de hidrógeno y su clasificación por colores. 69
Figura 16. Principales formas de producción de hidrógeno y su clasificación por colores. 70
Figura 17. Etapas de la cadena de valor del Hidrógeno.....71
Figura 18. Diagrama de flujo del proceso de reformado con vapor de agua. 72
Figura 19. Diagrama de flujo de la producción de hidrógeno mediante oxidación parcial de hidrocarburos. 74
Figura 20. Proceso de reformado autotérmico.....75

Figura 21. (a) Diagrama esquemático del sistema de reacción y (b) detalles del reactor de lecho fluidizado. 78
Figura 22. Diagrama de flujo simplificado de la producción de hidrógeno a partir del proceso Steam Iron. 80
Figura 23. Reactor de lecho fluidizado comercial..... 84
Figura 24. Hoja de flujo del proceso para la puesta a punto del reactor de reformado con vapor en la Unidad de Desarrollo de Procesos Termoquímicos. 85
Figura 25. Bioproceso de producción de hidrógeno a partir de la biomasa. 86
Figura 26. La demanda mundial de hidrógeno aumentó un 5% en 2021, como reflejo de la recuperación de la actividad económica en aplicaciones tradicionales tras los recorres relacionados con la pandemia. 88
Figura 27. La oferta y la demanda mundial promedio de hidrógeno. 91
Figura 28. Diagrama del proceso para la obtención de bioetanol. 99
Figura 29. Esquema simplificado de las etapas del proceso de obtención de bioetanol a partir de caña de azúcar. 102
Figura 30. Esquema simplificado de las etapas del proceso de obtención de bioetanol a partir de maíz. 102
Figura 31. Bioplásticos.} 118
Figura 32. Polietileno verde. 119
Figura 33. Ácido Poliláctico (PLA). 119
Figura 34. Diagrama de proceso para la obtención de un bioplástico. 120
Figura 35. Planta de bioetanol en Hugoton, Kansas (EEUU)..... 129

Figura 36. Planta productora de Bioetanol en Brasil. 130
Figura 37. Banano de rechazo. 136
Figura 38. Residuos orgánicos vegetales. 138
Figura 39. Diagrama de flujo de la planta experimental. 148
Figura 40. Modelo propuesto de la encapsulación enzimática. ...150
Figura 41. Evaluación catalítica del biocatalizador en función de la cantidad de agua. Condiciones de reacción: 2g aceite girasol, 1 ml etanol absoluto, 84 µl de agua, 2h a 37 °C y 180 rpm.....151
Figura 42. Diagrama esquemático del aparato experimental de lecho empacado. 153
Figura 43. Transesterificación de aceite de babasú con etanol....154
Figura 44. Producción de biodiesel a partir de aceites no comestibles utilizando biocatalizadores inmovilizados mixtos. 155
Figura 45. Biopolímeros que componen la biomasa lignocelulósica y los porcentajes comúnmente encontrados en la madera. 158
Figura 46. Biocombustibles sólidos a partir de biomasa residual. 160
Figura 47. Esquema del balance de masa en la torrefacción. 162
Figura 48. Materia prima (residuos forestales) almacenada para torrefacción. 164
Figura 49. Representación esquemática del proceso de torrefacción. 165
Figura 50. Esquema de planta de torrefacción industrial. 168
Figura 51. Instalaciones de torrefacción - CENER BIO2C. 168
Figura 52. Planta de pretratamiento de biomasa sólida. 169
Figura 53. Clasificación de los métodos de torrefacción. 170

Figura 54 Esquema y fotografía del reactor de torrefacción de tornillo. 179
Figura 55. Muestras de aserrín y borra de café torrefactadas. ...179
Figura 56. SEM de biocarbón de aserrín y de la borra de café a 225 °C, 250 °C y 275 °C. 180
Figura 57. Desechos de cáscara de coco. 184
Figura 58.Cáscara de cacao. 186
Figura 59. Micrografías SEM de residuos de celulosa. 188
Figura 60. Sistema compacto de torrefacción. 191
Figura 61. Residuos agrícolas. 192
Figura 62. Planta de Reformado Catalítico Continuo (CCR) en Argentina. 194
Figura 63. Proceso de reformado autotérmico. 198
Figura 64. Residuos de poda urbana. 199
Figura 65. Rastrojo de piña. 201
Figura 66. Esquema del equipo de reacción para reformado de glicerol con vapor de agua. 203
Figura 67. Proceso de gasificación y reformado catalítico de biomasa. 204
Figura 68. cultivo de microalgas en un laboratorio. 208
Figura 69. Fotobiorreactor Abierto (Tipo Raceway). 209
Figura 70. Fotobiorreactor Cerrado (Tubulares). 210
Figura 71. Reserva Biológica Limoncocha en Ecuador. 214
Figura 72. Invernadero de la granja experimental PUCE-SI. 216
Figura 73. Microscopía de Chlamydomonas reinhardtii cc124 y Chlorella sp. MACC-360 bajo diferentes Condiciones. 217

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN A LA BIOECONOMÍA CIRCULAR

La bioeconomía circular ha emergido como un modelo clave para abordar los desafíos globales de sostenibilidad, cambio climático y agotamiento de recursos. En Europa, este enfoque ha sido ampliamente adoptado desde hace tiempo, con la Unión Europea liderando iniciativas como el Pacto Verde y la Estrategia de Bioeconomía. Países como Alemania y Finlandia han implementado políticas innovadoras para integrar la bioeconomía en sectores como la agricultura, la energía y la industria. Por ejemplo, Alemania ha desarrollado biorefinerías (Figura 1) que transforman residuos agrícolas en biocombustibles y bioproductos, reduciendo la dependencia de los recursos fósiles (European Commission, 2020).



Figura 1. Biorrefinería para lograr una bioeconomía circular en España.

Fuente: Ruiz (2023).

Por su parte, en España, PERSEO Biotechnology (Figura 2) se destaca por su proceso patentado PERSEO Bioethanol®, el cual ya está en proceso de implementarse en los primeros proyectos de biorefinería industrial. Son expertos en la transformación de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y celulósicos (FORSU), cuentan con una biorrefinería semi industrial con fermentadores de 50 metros cúbicos. Participan en URBIOFIN, un proyecto que evidencia a nivel semi industrial la factibilidad tecnológica, económica y medioambiental de una biorrefinería integrada e innovadora para convertir FORSU en nuevos bioproductos de venta, componentes químicos (bioetanol, ácidos grasos volátiles y biogás), biopolímeros (biocomposites y polihidroalcanoato) y aditivos (microalgas hidrolizadas para fertilizantes y bioetileno), además de otros proyectos en base a estos residuos como materia prima. Esta empresa que aporta a la bioeconomía circular se basa en saber implementar su tecnología con otras para separarlo en fracciones importantes valorizables, darles el mayor uso a los residuos y obtener la máxima cantidad en productos de calidad (Ruiz, 2023).



Figura 2. Biorrefinería de PERSEO Biotechnology.

Fuente: Ruiz (2023).

En este sentido, existe también en España, el caso de la biorrefinería URBIOFIN, la cual nace a partir de la necesidad del aprovechamiento de residuos en el 2010, donde se recogieron un total de 483,7 kilogramos de residuos urbanos por habitante según la Estadística sobre Recogida de Residuos Urbanos del Instituto Nacional de Estadística (INE). Alrededor de la mitad corresponde a residuos orgánicos. Los restos de alimentos, el papel no reciclable como servilletas y papel de cocina usado, los restos vegetales de podas municipales… Todo esto constituye esa fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) (Ruiz, 2023).

Esta parte orgánica de los desechos urbanos alberga carbohidratos, proteínas y lípidos, sustancias valiosas que pueden transformarse en productos de gran valor para sectores como la industria química, la

agricultura y la cosmética, en vez de ser simplemente destinadas al vertedero o incineradas (Ruiz, 2023).

Por lo tanto, la meta del proyecto URBIOFIN consistió en evidenciar a nivel semiindustrial la factibilidad tecnológica, económica y ambiental de una biorrefinería integrada e innovadora para convertir la FORSU en nuevos bioproductos al alcance de la mano, elementos químicos (como bioetanol, ácidos grasos volátiles y biogás), biopolímeros (polihidroalcanoato y biocomposites) y aditivos (bioetileno y microalgas hidrolizadas para biofertilizantes) (Ruiz, 2023).

Este proyecto Europeo fue financiado por la BBI (Bio-based Industries Joint Undertaking), respaldado por un consorcio de 16 socios con representantes de la industria (como PERSEO Biotechnology), centros de investigación (CSIC, el CIEMAT y CLaMber) y universidades (Universidad de Wageningen, Wageningen University & Research, de los Países Bajos, y la Universidad de Valladolid) procedentes de ocho países de la Unión Europea; entre ellos Bélgica, Francia, Dinamarca y Grecia (Ruiz, 2023).

En China, la bioeconomía circular ha ganado relevancia como parte de su estrategia para alcanzar la neutralidad de carbono para 2060. El gobierno chino ha invertido en tecnologías de conversión de biomasa y ha promovido la utilización de residuos agrícolas y urbanos para la producción de energía y materiales. Un ejemplo destacado es el uso de algas para la producción de biocombustibles y plásticos biodegradables, lo que ha posicionado a China como un líder en innovación bioeconómica (Zhang et al., 2022).

Estados Unidos también ha avanzado significativamente en la implementación de la bioeconomía circular, con un enfoque en la investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles. El Departamento de Energía de los Estados Unidos ha financiado proyectos para la producción de biocombustibles a partir de cultivos no alimentarios y residuos forestales. Además, empresas estadounidenses han desarrollado bioplásticos que reducen la huella de carbono de la industria manufacturera (U.S. Department of Energy, 2019).

En México, la bioeconomía circular está ganando terreno, aunque aún enfrenta desafíos como la falta de infraestructura y financiamiento. Sin embargo, iniciativas como el uso de residuos de agave para la producción de bioenergía y la promoción de agricultura sostenible en regiones como Jalisco y Yucatán muestran un progreso prometedor. El gobierno mexicano ha comenzado a integrar la bioeconomía en su política ambiental, aunque se requiere mayor inversión en investigación y desarrollo (González et al., 2022).

En Sudamérica, países como Brasil y Argentina han aprovechado su vasta biodiversidad y recursos agrícolas para impulsar la bioeconomía circular. Brasil, por ejemplo, es un líder mundial en la producción de etanol a partir de caña de azúcar, y ha desarrollado tecnologías para convertir residuos agrícolas en biogás y fertilizantes orgánicos. Argentina, por su parte, ha promovido el uso de biomasa forestal para la generación de energía renovable. Estos avances han contribuido a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la región (FAO, 2021).

Los países extranjeros han aportado en el desarrollo de la bioeconomía circular mediante iniciativas en la pequeña y mediana empresa (PYME) en Rumania. Explocom GK es una empresa privada y familiar en Rumania que produce carbón vegetal, biocarbón y otros productos derivados, su capacidad en la actualidad se está actualizando para aceptar aproximadamente 112.000 toneladas de materia prima por año. La empresa utiliza como materia prima la biomasa sólida que ingresa al proceso luego de haber pasado por un proceso de presecado hasta alcanzar una humedad entre 15-20% para aplicar los procesos destinados a cada producto (Tihamer & Grande, 2022). Rumania genera anualmente millones de toneladas de residuos agrícolas y forestales, que en su mayoría no son aprovechados de manera eficiente. Estos residuos podrían ser transformados en biocarbón mediante procesos de pirólisis (Figura 3), una técnica que convierte la biomasa en un material rico en carbono bajo condiciones de baja oxigenación.

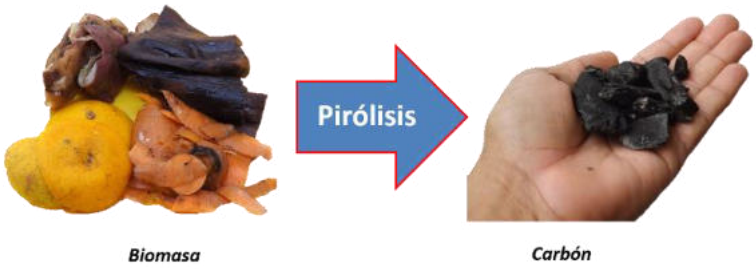


Figura 3. Biocarbón a partir de biomasa doméstica.

Fuente: Moron (2020).

El biocarbón emerge como una tecnología clave, no solo por su capacidad para secuestrar carbono, sino también por su potencial para mejorar la calidad del suelo y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la agricultura (Lehmann & Joseph, 2015). El biocarbón producido no solo puede ser utilizado como un suplemento para mejorar la fertilidad del suelo, sino también como una fuente de energía renovable (Kambo & Dutta, 2015). Según estudios recientes, la producción de biocarbón a partir de residuos agrícolas en Rumania podría reducir las emisiones de CO_2 en un 10-15% en el sector agrícola, al tiempo que mejoraría la productividad de los cultivos (Smith et al., 2019).

La aplicación de biocarbón en los suelos agrícolas ofrece múltiples beneficios. En primer lugar, mejora la retención de agua y nutrientes, lo que es especialmente relevante en regiones con suelos degradados o propensos a la sequía. En segundo lugar, el biocarbón actúa como un sumidero de carbono, secuestrando carbono en el suelo durante cientos o incluso miles de años, lo que contribuye a la mitigación del cambio

climático (Lehmann et al., 2021). Además, el uso de biocarbón puede reducir la necesidad de fertilizantes químicos, disminuyendo así los costos para los agricultores y reduciendo la contaminación de los cuerpos de agua por escorrentía de nitratos y fosfatos (Jeffery et al., 2017).

El biocarbón es un componente clave de la bioeconomía circular, ya que permite cerrar el ciclo de los recursos biológicos. Los residuos agrícolas y forestales pueden ser transformados en biocarbón, que a su vez puede ser utilizado para mejorar la productividad agrícola o como insumo en la producción de energía renovable. Este enfoque no solo reduce la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también promueve la creación de empleos verdes y el desarrollo de industrias locales basadas en la bioeconomía (European Commission, 2020). Por ejemplo, en la región de Transilvania (Rumania), proyectos piloto han demostrado que el uso de biocarbón en suelos agrícolas puede aumentar los rendimientos de los cultivos en un 20-30%, al tiempo que reduce las emisiones de GEI.

Respecto al aprovechamiento de residuos agroindustriales en Ecuador, se puede abordar la problemática de la Provincia de el Oro y su capital Machala que se destaca por su dinamismo agropecuario y pesquero, pero presenta problemas de contaminación de agua por metales pesados como el arsénico y cadmio generados por actividades minero metalúrgicas. En este sentido investigadores de la carrera de Ingeniería Química y de Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Ecuador en el año 2014 desarrollaron el trabajo de tesis de grado denominado Cinética de bioadsorción de arsénico

utilizando cáscara de banano maduro en polvo, trabajo que se encuentra publicado en la página de la FAO donde se pudo obtener un porcentaje de remoción de 99,77 % cuando se utilizó 8 g de harina de cáscara de banano maduro/L de solución de arsénico de 50 ppm con un tamaño de partícula de 250 µm (Ríos & Romero, 2014).

En lo referente al uso de biocarbones, en la UTMACH el Grupo de Investigación Aplicaciones Electroanalíticas y Bioenergía de la carrera de Ingeniería Química en conjunto con investigadores de la Facultad de Ciencias Agropecuarias en el año 2023 (Barrezueta-Unda et al., 2023), publicaron los resultados obtenidos durante la remoción de cadmio mediante la recirculación en biocarbón derivado de mazorca de cacao pirolizada a 400 °C demuestran un potencial significativo para aplicaciones en remediación ambiental. Este biocarbón mostró una capacidad máxima de adsorción (q_{max}) de 0,0556 mg de Cd/g de biocarbón y una afinidad por los iones Cd^{2+} de 0,2100, de acuerdo con el modelo de Langmuir, a una concentración inicial de 20 ppm de cadmio. La eficiencia del proceso depende de la porosidad del biocarbón, la cual se ve influenciada directamente por la temperatura de carbonización, lo que incrementa la accesibilidad de los sitios activos y mejora la capacidad de retención del adsorbato. Desde una perspectiva de bioeconomía circular, estos hallazgos representan una oportunidad estratégica para Ecuador, al permitir la valorización de residuos agrícolas del cacao, uno de sus principales productos de exportación. Al transformar desechos agroindustriales en insumos útiles para la descontaminación de suelos o aguas contaminadas con metales pesados como el cadmio, un problema relevante para la sostenibilidad

del sector cacaotero se crea una solución dual: mitigar pasivos ambientales y generar nuevos productos de valor agregado.

Esto abre la puerta a nuevas cadenas de valor bioeconómicas, en las que comunidades rurales, productores cacaoteros y emprendedores locales pueden participar activamente en la producción de biocarbón, mejorando ingresos y fomentando prácticas agroindustriales más sostenibles. Además, impulsa el cumplimiento de normativas internacionales sobre límites de cadmio en alimentos y fortalece la competitividad del cacao ecuatoriano en mercados exigentes.

Por otro lado, el crecimiento económico ha generado desafíos ambientales significativos, relacionados con la gestión inadecuada de residuos y la contaminación de sus recursos naturales. En este contexto, la bioeconomía circular emerge como una alternativa innovadora y sostenible para transformar estos problemas en oportunidades de desarrollo.

Uno de los principales retos en la localidad es el manejo de los residuos agropecuarios, como el suero de leche, un subproducto de la industria láctea que, si no es tratado adecuadamente, contamina los suelos y fuentes de agua. Además, la industria camaronera, pilar económico de la región, genera grandes cantidades de esqueletos de camarón, ricos en quitina, un recurso valioso que actualmente se desperdicia. Por otro lado, los lixiviados del relleno sanitario representan una amenaza latente para la salud pública y los ecosistemas, debido a su alta carga contaminante.

Asimismo, las aguas servidas, tanto negras como grises, son vertidas sin tratamiento adecuado, afectando cuerpos de agua como los esteros El Macho y El Huayla (Machala, Ecuador), que son vitales para la biodiversidad local. Estos problemas ambientales no solo impactan la calidad de vida de los habitantes, sino que también limitan el potencial económico de la región.

La bioeconomía circular se basa en tres principios fundamentales: la eliminación de residuos y contaminación desde el diseño, la mantención de productos y materiales en uso el mayor tiempo posible, y la regeneración de sistemas naturales. En Machala y la Provincia de El Oro, este enfoque puede aplicarse a través del aprovechamiento de los residuos generados por las industrias bananera, camaronera y arrocera, entre otras, para producir bioenergía, biofertilizantes, bioplásticos y otros productos de alto valor agregado. Este escrito explora las oportunidades y desafíos de implementar un modelo de bioeconomía circular en Machala, destacando las tecnologías y estrategias que pueden ser utilizadas para transformar los residuos en recursos.

La industria bananera es el motor económico de Machala, pero también es una de las principales fuentes de residuos orgánicos. Se estima que, por cada tonelada de banano exportado, se generan aproximadamente 2 toneladas de residuos, incluyendo pseudotallos, hojas, racimos no comercializables y cáscaras. Estos residuos, que son quemados o dejados en los campos, representan una oportunidad única para la bioeconomía circular.

Los residuos bananeros, como pseudotallos, hojas y cáscaras, representan una fuente importante de materia orgánica que puede ser aprovechada para la producción de biogás mediante digestión anaeróbica. Este proceso consiste en la descomposición de la materia orgánica por microorganismos en ausencia de oxígeno, generando una mezcla de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). El biogás puede ser utilizado como combustible para la generación de electricidad o calor, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. El proceso comienza con la trituración de los residuos bananeros para facilitar su descomposición. Luego, los residuos triturados son introducidos en un biodigestor, donde los microorganismos anaeróbicos descomponen la materia orgánica en biogás y digestato. El biogás es purificado para eliminar impurezas como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), mejorando su calidad como combustible. El biogás purificado es utilizado en motores de combustión interna o turbinas para generar electricidad o calor (Zhang et al., 2015).

La mezcla de excrementos animales, suero de leche y otros residuos orgánicos puede ser aprovechada para producir lixiviados ricos en aminoácidos (Figura 4), un recurso valioso para la nutrición vegetal. Los excrementos, como estiércol de ganado o aves de corral, contienen una alta concentración de nitrógeno orgánico, mientras que el suero de leche aporta proteínas y lactosa, que son fuentes adicionales de carbono y nitrógeno. Al combinar estos materiales en un proceso de fermentación controlada, los microorganismos descomponen las proteínas y otros compuestos nitrogenados, liberando aminoácidos como la glicina, la glutamina y la prolina, que son esenciales para el crecimiento de las plantas. Este proceso se optimiza ajustando

parámetros como la relación carbono-nitrógeno (C/N), la humedad y la temperatura, lo que permite maximizar la producción de aminoácidos (Gómez et al., 2011).



Figura 4. Lixiviados ricos en aminoácidos.

Fuente: La Huerta de Iván (2020).

El lixiviado resultante es un líquido rico en nutrientes que puede ser aplicado directamente al suelo o utilizado como base para la formulación de biofertilizantes líquidos. Además de aminoácidos, estos lixiviados contienen otros compuestos beneficiosos, como ácidos húmicos y fúlvicos, que mejoran la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes. La aplicación de estos lixiviados en cultivos ha demostrado aumentar la productividad y la resistencia de las plantas a estrés abiótico, como la sequía o la salinidad. Este enfoque no solo valoriza residuos que de otro modo serían desechados, sino que también contribuye a la sostenibilidad agrícola al reducir la dependencia de fertilizantes químicos (Tejada et al., 2009).

Por otro lado, las fibras de los pseudotallos o raquis de banano (Figura 5) pueden ser utilizados para la producción de bioplásticos, materiales biodegradables que pueden reemplazar a los plásticos derivados del petróleo. El proceso de producción de bioplásticos comienza con la extracción de fibras de los pseudotallos mediante procesos mecánicos o químicos. Las fibras son tratadas con ácidos o enzimas para obtener polímeros naturales, como la celulosa. Los polímeros son mezclados con plastificantes naturales, como glicerol, para mejorar su flexibilidad y resistencia. El material resultante es moldeado en formas específicas, como films o bolsas, mediante técnicas de extrusión o inyección.



Figura 5. Residuos bananeros, raquis de banano.

Fuente: Favorita Ecuador (2020).

Machala es también un importante centro de producción camaronera, actividad que genera grandes cantidades de residuos, como cabezas, cáscaras y vísceras de camarón (Figura 6). Estos residuos son ricos en quitina, un polisacárido que contiene nitrógeno y que puede ser transformado en quitosano, un material con múltiples aplicaciones en la agricultura, la industria y la medicina.

La quitina puede ser extraída de los residuos de camarón mediante procesos químicos o biológicos. Una vez purificada, la quitina puede ser desacetilada para producir quitosano, un material biodegradable con propiedades antimicrobianas, antifúngicas y de retención de agua. En la agricultura, el quitosano puede ser utilizado como bioestimulante para mejorar el crecimiento de las plantas y aumentar su resistencia a enfermedades.



Figura 6. Residuos camaroneros, cáscara de camarón.

Fuente: Tapia (2018).

El quitosano también tiene aplicaciones en la industria alimentaria, donde puede ser utilizado como conservante natural para prolongar la vida útil de frutas y verduras. En Machala, esto podría ser especialmente útil para reducir las pérdidas poscosecha de productos como el banano y el cacao, que son sensibles a la descomposición (Smith et al., 2020).

Los residuos de la industria camaronera también pueden ser utilizados para la producción de biocombustibles, como el biodiesel, mediante

procesos de transesterificación. Este biocombustible podría ser utilizado para alimentar maquinaria agrícola y embarcaciones pesqueras, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y promoviendo la sostenibilidad de la acuicultura en la región (Bhattacharyya & Jha, 2012). El biodiésel se sitúa como una de las alternativas más eficientes en términos de producción y calidad, en la ciudad de Machala y en todas las ciudades del país, la utilización de aceites vegetales destinados para frituras, es una actividad en el ámbito culinario que se produce todos los días, estos aceites usados previamente son comúnmente desechados en las redes de alcantarillado de la ciudad o en su caso son desechados en rellenos sanitarios contaminando el suelo, estos aceites pueden servir para darle un valor agregado siendo considerados un desecho. La producción de biodiésel a partir de estos aceites desechados es la mejor alternativa sostenible haciendo énfasis en la bioeconomía circular, en investigaciones realizadas en la Universidad Técnica de Machala, específicamente en la carrera de Ingeniería Química se ha promovido la utilización de carbones de distintas fuentes de biomasa, analizando su procedencia, características y mayor eficiencia al actuar como un catalizador en las reacciones de ruptura de los triacilglicéridos y obtener un producto con un mayor grado de pureza.

La producción de arroz es otra actividad importante en El Oro, pero también genera grandes cantidades de paja de arroz, un residuo que tradicionalmente es quemado en los campos, liberando grandes cantidades de CO_2 y otros contaminantes al aire. Sin embargo, la paja de arroz puede ser aprovechada de diversas maneras dentro de un modelo de bioeconomía circular.

La paja de arroz puede ser sometida a un proceso de pirólisis (descomposición térmica en ausencia de oxígeno) para producir biochar, un material carbonoso que puede ser utilizado como enmienda del suelo. El biochar mejora la retención de agua y nutrientes en el suelo, aumentando su fertilidad y contribuyendo a la captura de carbono (Zhang et al., 2015).

Además, las fibras de la paja de arroz pueden ser utilizadas para la producción de papel y cartón, reduciendo la necesidad de pulpa de madera y contribuyendo a la conservación de los bosques. En Machala, esto podría impulsar la creación de pequeñas empresas dedicadas a la fabricación de productos de papel reciclado (Liu et al., 2013). La paja de arroz también puede ser utilizada como combustible para la generación de energía en plantas de biomasa. Este tipo de energía renovable podría ser utilizada para abastecer a las comunidades rurales, donde el acceso a la electricidad es limitado (Smith et al., 2020).

La implementación de un modelo de bioeconomía circular en Machala requiere de la colaboración entre el sector público, el sector privado y la comunidad local. Algunos de los desafíos que deben ser abordados incluyen la falta de infraestructura para el procesamiento de residuos, la necesidad de capacitación en tecnologías sostenibles y la creación de mercados para los productos derivados de la bioeconomía circular.

La bioeconomía circular ofrece soluciones viables para estos desafíos, promoviendo la valorización de residuos, la reducción de la contaminación y la generación de nuevos productos y mercados. Por ejemplo, el suero de leche puede convertirse en biogás o fertilizantes,

la quitina de los esqueletos de camarón en bioplásticos o productos farmacéuticos, y los lixiviados y aguas servidas pueden tratarse para recuperar nutrientes y agua reutilizable.

La bioeconomía circular puede generar empleos verdes, reducir la dependencia de insumos externos y mejorar la competitividad de las industrias locales. Además, puede contribuir a la conservación de los recursos naturales y a la mitigación del cambio climático, beneficiando no solo a Machala, sino a todo el país, en los siguientes capítulos o apartados se hará énfasis más detalladamente de los procesos diseñados dentro del ámbito de reutilización de desechos y bioeconomía circular en nuestra localidad, partiendo de los principios y perspectivas de la química analítica y química verde.

CAPÍTULO II

2. SINERGÍAS ENTRE QUÍMICA ANALÍTICA Y QUÍMICA VERDE

La química analítica (electroanalítica, espectroscopías, cromatografías, microscopías) y la química verde forman una alianza estratégica para el desarrollo de soluciones sostenibles, especialmente en el monitoreo y control de la contaminación ambiental. La química analítica aporta métodos precisos y sensibles para la detección, identificación y cuantificación de contaminantes presentes en todo tipo de residuos que se proyectan para una potencial valorización económica, mientras que, la química verde guía el diseño de estos métodos hacia procesos de aprovechamiento aplicados más seguros, eficientes y ambientalmente responsables.

En este contexto, la electroanalítica ha emergido como una herramienta poderosa dentro de la química analítica verde, gracias a su alta sensibilidad, portabilidad, bajo costo y escaso uso de reactivos. Técnicas como la voltamperometría, potenciometría y sensores electroquímicos permiten el monitoreo en tiempo real de contaminantes en agua, aire y suelos, incluyendo metales pesados (como Cd^{2+}, Pb^{2+}, Hg^{2+}), microplásticos, pesticidas, fármacos y contaminantes emergentes.

Estos avances han dado lugar al desarrollo de sensores electroquímicos miniaturizados, de bajo consumo energético y a menudo fabricados con materiales renovables o reciclados, alineándose plenamente con los principios de la química verde. Además, los sistemas electroanalíticos

pueden ser integrados en redes de vigilancia ambiental, facilitando la gestión de riesgos ecológicos y sanitarios en tiempo real y con mínima generación de aguas residuales.

Desde el 2014 investigadores de carrera de ingeniería Química en la UTMACH han publicado más 15 artículos científicos indexados en SCOPUS sobre desarrollo de métodos electroanalíticos para cuantificación de metales pesados en agua, sedimentos, conchas, leche, siendo el más reciente en el año 2023, donde el Grupo de Investigación Aplicaciones Electroanalíticas y Bioenergía en conjunto con investigadores de la Escuela de Ciencias Químicas de Pontificia Universidad Católica del Ecuador evaluaron la efectividad de un microelectrodo de fibra de carbono modificado con bismuto in situ (sensor voltamperométrico) para detectar simultáneamente Pb, Cd y Zn en sedimentos marinos de Puerto Jeli en la provincia de El Oro, Ecuador (Fernández et al., 2023). Se aplicó voltamperometría de extracción anódica de pulso diferencial y la regresión lineal resultante para la cuantificación del metal osciló entre 12 y 50 µg mL-1, con límites de cuantificación para Pb (II), Cd (II) y Zn (II) de 18,69, 12,55 y 19,29 µg mL-1, respectivamente. Así, quedó demostrada que la cuantificación con el sensor fue exitosa. Según los resultados preliminares, los valores de Cd y Pb excedieron los límites permisibles establecidos por Ecuador en el TULSMA (Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, respectivamente (Fernández et al., 2023).

La provincia de El Oro, motor agrícola, pesquero y minero del Ecuador, enfrenta una creciente acumulación de contaminantes como metales

pesados, pesticidas, microplásticos y fármacos que amenazan la transición hacia una bioeconomía circular. Estos elementos tóxicos, derivados de la minería informal, agricultura intensiva, mal manejo de residuos y aguas residuales, impactan negativamente la salud del suelo, la biodiversidad, los recursos hídricos y la seguridad alimentaria.

La química analítica juega un rol esencial al permitir el monitoreo preciso y constante de estos contaminantes en agua, aire, suelos, flora, fauna y en los seres humanos. Su aplicación mediante técnicas modernas permite identificar fuentes de contaminación, cuantificar riesgos y diseñar estrategias de mitigación basadas en evidencia. Sin embargo, el control no es suficiente sin una transformación estructural. Aquí, la química verde ofrece una ruta hacia la prevención, promoviendo el diseño de procesos agrícolas e industriales más limpios, biodegradables y de bajo impacto ambiental, y fomentando el uso de bioinsumos, tecnologías limpias y materiales renovables. Implementar enfoques analíticos de forma integrada es clave para proteger los ecosistemas agrícolas, las fuentes de agua y la salud humana, al mismo tiempo que se crean nuevas oportunidades económicas y sociales. Así, la sinergia entre ambas ramas de la química se convierte en un pilar fundamental para avanzar hacia una sostenibilidad ambiental, económica y social real en la región.

El reto de la química verde está dado porque en la actualidad la sociedad mundial está fuertemente vinculada con los productos químicos y sus procedimientos. Por estos vínculos y dado que se conocen ampliamente algunas de las interacciones perjudiciales que muchos de ellos han experimentado en el entorno. Los individuos tienen el derecho a llevar

una vida sana y productiva en sintonía con el medio ambiente (Doria, 2009).

Uno de los conceptos más atractivos en química para lograr la sustentabilidad es la Química Verde, también conocida como química sostenible, es un enfoque que busca diseñar productos y procesos químicos que reduzcan o eliminen el uso y generación de sustancias peligrosas (Doria, 2009). La Química Verde propone una filosofía innovadora y establece normas elevadas para la investigación y fabricación de sustancias y procesos químicos, optimizando sus ventajas y reduciendo los efectos adversos que pueden perjudicar tanto a las personas como al entorno (Figura 7). Este paradigma se basa en los 12 principios de la Química Verde, propuestos por Paul Anastas y John Warner, que incluyen la prevención de residuos, el diseño de productos y procesos más seguros, y el uso de materias primas renovables (Anastas & Warner, 1988).



Figura 7. Química verde y un futuro más limpio.

Fuente: EcoPortal (2024).

Adicionalmente, la química verde es una herramienta esencial para la transición hacia economías sostenibles y circulares. En un contexto global marcado por la urgencia climática, la escasez de recursos y la necesidad de descarbonización, la química verde impulsa el diseño de procesos y productos que minimizan el uso de sustancias peligrosas, reducen residuos y optimizan el uso de materias primas renovables. Hoy más que nunca, representa un pilar para la innovación responsable, la bioeconomía y la transformación industrial orientada al bienestar humano y ambiental.

Esta declaración sintetiza los principios fundamentales de la química verde con su rol estratégico en los objetivos de desarrollo sostenible, la industria 4.0 y la bioeconomía.

En este sentido, en el 2021 en la UTMACH científicos del Grupo de Investigación Aplicaciones Electroanalíticas y Bioenergía en colaboración con investigadores de la carrera de Ingeniería Agrícola, debido a problemas de comercialización de piñas ecuatorianas en supermercados alemanes por afectación de su calidad visual por *fusarium sp.* evaluaron y publicaron los resultados de la eficiencia de soluciones de nanocobre como fungicida en el control de este hongo, en la piel de esta fruta (Romero et al., 2024). Las soluciones anti fúngicas se obtuvieron mediante ionización electroquímica. Se aisló el Fusarium sp. de muestras de epicarpio de piña, para posteriormente medir el anillo de inhibición en placas Petri. Se prepararon soluciones de nanocobre a 3, 6 y 9 ppm. Las piñas se sometieron a desinfección mediante inmersión en estas soluciones durante 3, 6 y 9 min, siguiendo un diseño experimental de 3^2, con triplicados y controles con agua destilada. En

este sentido, se evaluó el número de UFC/mL del hongo en la superficie de la fruta a los 0 y 5 días después de la inmersión. Los resultados muestran que, en lo referente al crecimiento del anillo de inhibición de Fusarium sp. en agar PDA (agar papa dextrosa), se redujo hasta un 53% cuando se utilizó una solución de nanopartículas de cobre a una concentración de 9 ppm, en comparación con el tratamiento control. En lo referente a la inhibición de Fusarium sp. en la superficie de las piñas mediante desinfección por inmersión, los mejores tratamientos para el día 0 de inmersión resultaron ser la desinfección durante 9 min en la solución de nanocobre a concentraciones de 6 y 9 ppm (Romero et al., 2024).

Otros resultados positivos de química verde en la UTMACH incluyen el uso de iones metálicos como una alternativa sostenible en la mejora fitosanitaria de los cultivos agrícolas donde sus residuos tienen una potencial aplicación bioeconómica, porque en el caso de la piña, banano entre otros se usan diversos fungicidas sintéticos de amplio espectro, muchos de los cuales representan riesgos significativos de contaminación ambiental, especialmente en cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Entre los fungicidas más comúnmente usados se encuentran: tebuconazol (triazol sistémico), mancozeb (ditiocarbamato), los cuales tienen alta persistencia en el suelo y potencial de movilidad hacia cuerpos de agua por escorrentía o lixiviación, son tóxicos para organismos acuáticos y pueden actuar como disruptores endocrinos, causan contaminación de ríos, esteros, humedales y acuíferos, afectando no solo la biodiversidad, sino también la calidad del agua para consumo humano y riego. Riesgo de bioacumulación en peces y organismos acuáticos, alterando cadenas

alimenticias. Compromiso de la certificación ambiental y de exportación, especialmente en mercados donde se monitorean residuos de plaguicidas en frutas

La Química Analítica es fundamental para evaluar la sostenibilidad de los procesos químicos. A través de técnicas como la espectrometría de masas, la cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC) y la espectroscopía infrarroja, los químicos pueden identificar y cuantificar los compuestos presentes en una reacción, así como detectar subproductos no deseados o contaminantes (Gałuszka et al., 2013). Estas herramientas permiten optimizar los procesos para minimizar el uso de reactivos tóxicos, reducir el consumo de energía y maximizar la eficiencia de los recursos. Por ejemplo, en la síntesis de fármacos, la Química Analítica ha permitido desarrollar rutas sintéticas más limpias, reduciendo la generación de residuos peligrosos (Sheldon, 2017).

En el campo de las energías renovables, la Química Analítica es esencial para el desarrollo de tecnologías como las celdas solares, las baterías de ion-litio y los biocombustibles. Por ejemplo, la espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) se utiliza para estudiar las interfaces en celdas solares, optimizando su eficiencia y durabilidad. En el caso de los biocombustibles, la cromatografía de gases permite analizar la composición de los aceites vegetales y los productos de pirólisis, asegurando que cumplan con los estándares de calidad y sostenibilidad (Knothe, 2010).

El objetivo de la Química Analítica en conjunto con la Química Verde es emplear métodos analíticos que produzcan residuos menos riesgosos

y que sean beneficiosos para el medio ambiente sin alterar la producción de resultados de manera rápida, eficiente y efectiva. Esto puede conseguirse creando nuevas técnicas de análisis o alterando las ya existentes para incluir procedimientos que faciliten la consecución de los objetivos. Un caso ilustrativo son los detectores de "huellas dactilares" de iones (ion footprint detector), que no necesitan extraer los componentes de una mezcla para su análisis; en otras palabras, no se requieren interferencias. Esto disminuye en un 90% el disolvente para la cromatografía GC/MS y en un 50% para la cromatografía LC/MS (Doria, 2009).

A pesar de los avances, la Química Analítica aplicada a la Química Verde enfrenta varios desafíos. Uno de ellos es la necesidad de desarrollar técnicas más sensibles y selectivas para detectar contaminantes emergentes, como microplásticos y fármacos en el agua (Richardson & Kimura, 2019). Además, es crucial integrar la Química Analítica con otras disciplinas, como la biotecnología y la ingeniería de procesos, para diseñar soluciones más holísticas y sostenibles. Finalmente, la educación y la formación de profesionales en Química Analítica y Química Verde serán fundamentales para impulsar la transición hacia una economía circular y baja en carbono.

CAPÍTULO III

3. NITRÓGENO

3.1 El nitrógeno y sus métodos convencionales de obtención

El nitrógeno (N) es un elemento químico esencial para la vida, presente en el 78% de la atmósfera terrestre en forma de gas diatómico (N_2). Sin embargo, para ser utilizado por los organismos vivos, el nitrógeno debe ser convertido en formas asimilables, como el amonio (NH_4^+) o el nitrato (NO_3^-), a través de procesos biológicos y químicos. En el contexto de la bioeconomía circular, el nitrógeno se considera un recurso valioso que puede ser recuperado de residuos orgánicos, como los lodos residuales, para su reutilización en la agricultura y otros sectores (Ersahin et al., 2023).

El gas nitrógeno es un componente esencial de la industria química para la producción, procesamiento, manejo y envío de sustancias químicas. Dado que es un gas inerte, es idóneo para una variedad de usos como los mencionados. Por su baja reactividad, el nitrógeno es un gas de protección y purga eficaz que se puede emplear para salvaguardar productos de gran valor de contaminantes perjudiciales. Además, facilita el almacenaje y utilización segura de sustancias inflamables y puede contribuir a evitar explosiones de polvo inflamable. El gas nitrógeno tiene la capacidad de eliminar los contaminantes de los flujos de proceso mediante técnicas como la extracción y el burbujeo (Ivanova & Lewis, 2012).

Por el aumento y expansión de su uso en las industrias de procesos químicos (CPI), las compañías de gases industriales han estado optimizando de manera constante los procesos de producción y abastecimiento de nitrógeno para convertirlos en más eficaces y lucrativos. En la actualidad, hay numerosas tecnologías de nitrógeno y formas de suministro que satisfacen una diversidad de especificaciones, que abarcan pureza, uso, portabilidad, espacio y consumo energético.

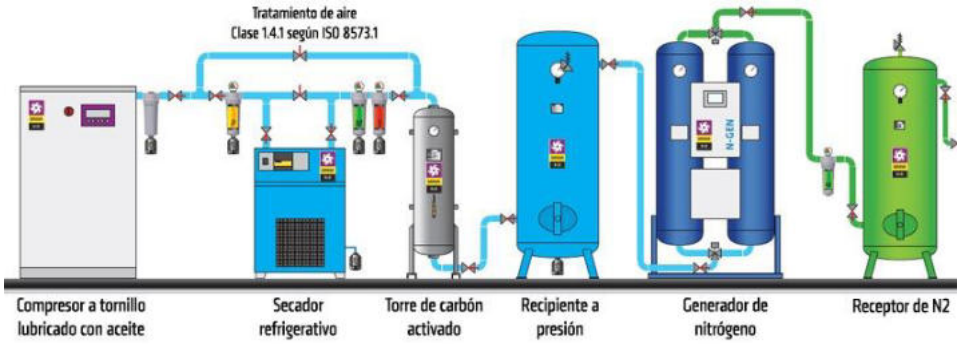


Figura 8. Estación de compresión con generador de nitrógeno.

Fuente: Omega Air (2019).

Los generadores de nitrógeno y los sistemas de compresión como el presente en la Figura 8, además como la adsorción por oscilación de presión (PSA) o los sistemas de membrana, pueden resultar más lucrativos que la destilación criogénica convencional o el nitrógeno líquido almacenado, especialmente si no se necesita una alta pureza (Ivanova & Lewis, 2012).

3.1.1 Proceso Haber-Bosch

El proceso Haber-Bosch es un método industrial para la síntesis de amoníaco (NH_3) a partir de nitrógeno (N_2) e hidrógeno (H_2). Fue desarrollado a principios del siglo XX por los químicos Fritz Haber y Carl Bosch, y revolucionó la producción de fertilizantes nitrogenados, permitiendo la fabricación a gran escala de compuestos como el nitrato de amonio (NH_4NO_3) y la urea ($CO(NH_2)_2$). Este proceso es fundamental para la agricultura moderna, ya que proporciona el nitrógeno necesario para el crecimiento de las plantas, pero también tiene un impacto significativo en el medio ambiente debido a su alto consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero. Se estima que este proceso consume aproximadamente el 1-2% de la energía global y es responsable de alrededor del 1.4% de las emisiones mundiales de CO_2 (Zhang & Liu, 2021).

La reacción global de formación de amoníaco mediante este proceso es la siguiente:

$$\frac{1}{2}N_2 + \frac{3}{2}H_2 \rightarrow NH_3$$

$$\Delta H^{\circ} = -45{,}7\frac{kJ}{mol} \quad \boldsymbol{Ec.1}$$

De acuerdo a la entalpía de reacción, se trata de una reacción exotérmica, además es una reacción reversible, es decir, puede producirse la síntesis o en su caso la descomposición de amoníaco, así su velocidad neta de reacción bajo las condiciones de equilibrio es igual a cero, debido a que en ambos sentidos se produce la misma velocidad.

Debido a que es una reacción de liberación de calor, es necesario la presencia de un sistema de refrigeración que va a permitir la separación de amoníaco y de los gases no reactivos, los cuales pueden ser devueltos al proceso y mejorar su rendimiento (Ramos, 2015).

El proceso se lleva a cabo bajo unas condiciones de operación específicas (Figura 9), temperaturas en torno a 250-400 °C y a una presión de 750 bares para una conversión del 100% a amoníaco, sin embargo, la energía necesaria para mantener estas condiciones es demasiado elevada y no resultando seguro ni práctico para el sistema. Se suele utilizar una presión alrededor de 200 bares y a una temperatura de 475 °C, en otras palabras, la reacción debe producirse a altas presiones, pero a bajas temperaturas. El catalizador actúa absorbiendo las moléculas de N_2 en su superficie, de esta manera se debilita el enlace N-N interatómico, los cuales, al disociarse se unen a los átomos de H que se provienen de la disociación de hidrógeno, ambas disociaciones son producidas en la membrana del catalizador (Ramos, 2015).

Este proceso a lo largo de los años solo ha tenido de desarrollo la optimización de catalizadores que pueden dar mejores resultados al intervenir en la reacción. En un principio se utilizaba un catalizador de osmio en torno a temperaturas de 500 °C y presiones de entre 120-200 bares, pero debido a su naturaleza escasa se buscó nuevas alternativas como catalizadores de hierro, más abundantes, pero menos efectivos que el osmio, consistiendo en un material de magnetita reducido (Fe_3O_4), normalmente se enriquece con óxidos de aluminio o potasio para mejorar el rendimiento del catalizador (Ramos, 2015).

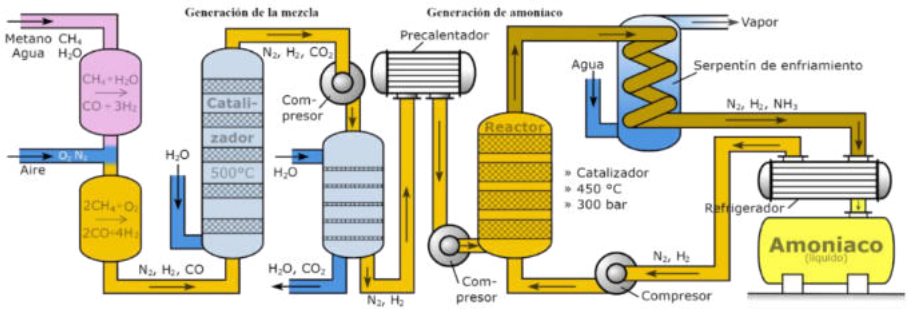


Figura 9. Diagrama de proceso Haber-Bosch.

Fuente: Wikipedia (2024).

El amoníaco producido se utiliza principalmente para la fabricación de fertilizantes nitrogenados, que son esenciales para mantener la productividad agrícola y alimentar a una población mundial en crecimiento. Sin embargo, el proceso es altamente intensivo en energía, ya que requiere grandes cantidades de gas natural (CH_4) como fuente de hidrógeno y para generar el calor necesario para la reacción (Ersahin et al., 2023).

En términos generales el nitrógeno es un elemento esencial para la vida, desempeñando un papel crucial en la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos y otros compuestos biológicos. En el contexto de la bioeconomía circular, el aprovechamiento del nitrógeno a partir de residuos y mediante métodos de química verde se convierte en una estrategia clave para promover la sostenibilidad ambiental y económica, cerrando su ciclo en la naturaleza (Figura 10) y aprovechando su obtención de fuentes renovables.

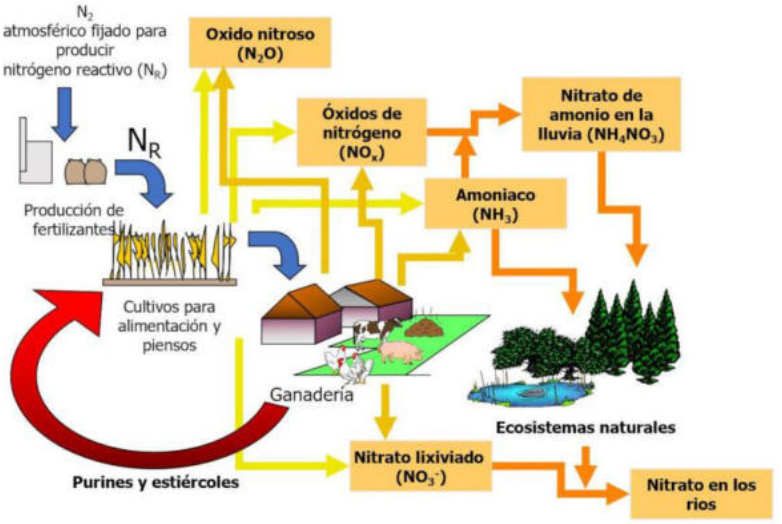


Figura 10. El nitrógeno en el medio ambiente.

Fuente: Sanz (2022).

3.2 El nitrógeno en la agricultura

El nitrógeno (N) es uno de los elementos más críticos para la vida en la Tierra y desempeña un papel fundamental en la agricultura. Es un componente esencial de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y clorofila, moléculas indispensables para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Marschner, 2012). Sin embargo, a pesar de su abundancia en la atmósfera (donde constituye el 78% del aire), el nitrógeno en su forma gaseosa (N_2) no es directamente utilizable por la mayoría de los organismos vivos. Las plantas dependen principalmente del nitrógeno en formas asimilables, como el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-), que son absorbidos a través de sus raíces (Hirel et al., 2011).

La Revolución Verde de mediados del siglo XX marcó un hito en la agricultura al introducir el uso masivo de fertilizantes sintéticos de nitrógeno, como la urea y el nitrato de amonio (Figura 11). Estos fertilizantes permitieron aumentar significativamente los rendimientos agrícolas, contribuyendo a la seguridad alimentaria global (Erisman et al., 2008). Sin embargo, su uso excesivo ha generado problemas ambientales graves, como la contaminación de aguas subterráneas y la emisión de gases de efecto invernadero (Galloway et al., 2013).



Figura 11. El nitrógeno en la agricultura.

Fuente: Sánchez (2021).

En la actualidad, se estima que alrededor del 50% del nitrógeno aplicado en los campos agrícolas no es absorbido por las plantas, sino que se pierde en el medio ambiente a través de la lixiviación, volatilización y desnitrificación (Zhang et al., 2015). Esta ineficiencia no solo representa un desperdicio económico, sino también una amenaza para los ecosistemas y la salud humana. Por lo tanto, es crucial

desarrollar prácticas agrícolas más sostenibles que optimicen el uso del nitrógeno y minimicen sus impactos negativos.

3.3 El nitrógeno como contaminante

La contaminación por nitrógeno es uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI. El ciclo del nitrógeno, alterado por las actividades humanas, ha dado lugar a una serie de problemas ecológicos y de salud pública. Uno de los principales impactos es la eutrofización de cuerpos de agua (Figura 12), un proceso en el que el exceso de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, provoca el crecimiento descontrolado de algas y plantas acuáticas. Cuando estas algas mueren y se descomponen, consumen el oxígeno disuelto en el agua, creando zonas muertas donde la vida marina no puede sobrevivir (Diaz & Rosenberg, 2008). Ejemplos notables incluyen el Golfo de México y el Mar Báltico, donde las zonas muertas han alcanzado extensiones alarmantes.

Los lixiviados de vertederos (LL) y los lodos residuales son fuentes importantes de nitrógeno que, si no se manejan adecuadamente, pueden contribuir a la contaminación del agua (Ersahin et al., 2023). La ingesta de altos niveles de nitratos se ha relacionado con problemas de salud como la metahemoglobinemia o "síndrome del bebé azul", que afecta principalmente a los lactantes (Ward et al., 2018). También se ha asociado con un mayor riesgo de cáncer y otras enfermedades crónicas.



Figura 12. Eutrofización y contaminación del agua.

Fuente: Aquatic World (2017).

En la localidad unos de los principales focos de contaminación por nitrógeno es la falta de regulación en la aplicación de fertilizantes nitrogenados en los cultivos, los agricultores en muchos casos por desconocimiento o falta de capacitaciones sobre el tema, no fertilizan sus cultivos en muchos casos con las dosis o cantidades adecuadas por su requerimiento, el exceso de fertilización o de nitrógeno en el suelo puede contaminarlo y en vez de mejorar el rendimiento de las plantas, pueden perjudicar su desarrollo y producción por la contaminación presentada por medio de una intoxicación de la planta.

En la atmósfera, el nitrógeno se libera en forma de óxidos de nitrógeno (NOx) y amoníaco (NH_3), que contribuyen a la formación de lluvia ácida y partículas finas (PM2.5), afectando la calidad del aire y la salud humana. Además, el óxido nitroso (N_2O), un subproducto de la desnitrificación, es un potente gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 300 veces mayor que el dióxido de carbono (CO_2) (IPCC, 2014).

3.4 Residuos orgánicos como fuente de nitrógeno verde

Machala genera grandes cantidades de residuos orgánicos derivados de la producción agrícola, como desechos de banano, cáscaras de frutas y estiércol de ganado. Estos residuos representan una oportunidad valiosa para la obtención de nitrógeno verde y compuestos con base nitrogenada para su uso en la productividad local. Nitrógeno verde es un concepto que se refiere al nitrógeno recuperado de fuentes orgánicas y reciclado en sistemas agrícolas sostenibles (Chávez et al., 2020).

La industria bananera, que genera grandes cantidades de desechos como pseudotallos o los llamados raquis de banano, hojas y racimos no comercializables. Estos residuos pueden ser utilizados para la producción de biofertilizantes ricos en nitrógeno mediante procesos de compostaje y digestión anaeróbica. El compostaje es un proceso biológico que transforma los residuos orgánicos en un material estable y rico en nutrientes, incluyendo nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), como subproductos de la descomposición microbiana. Por otro lado, la digestión anaeróbica produce biogás y un digestato o lixiviados ricos en nutrientes, que puede ser utilizado como fertilizante líquido (Zhang et al., 2015), empleando en la zona en cultivos propios como el banano y el arroz.

La quitina y el quitosano, que como se mencionó anteriormente, pueden ser obtenidos a partir de residuos de la industria o sector camaronero (Figura 13), dichos compuestos contienen nitrógeno y que tienen aplicaciones en la agricultura como bioestimulantes y en la industria como materiales biodegradables.



Figura 13. El quitosano y sus fuentes de obtención.

Fuente: PeakD (2018).

La química verde ofrece alternativas sostenibles para la obtención de nitrógeno a partir de fuentes renovables. Uno de los métodos más prometedores es la fijación biológica de nitrógeno (FBN), que implica el uso de microorganismos, como las bacterias del género Rhizobium, para convertir el nitrógeno atmosférico (N_2) en formas asimilables por las plantas, como el amonio. Este proceso puede ser potenciado mediante la inoculación de cultivos con cepas específicas de bacterias fijadoras de nitrógeno, lo que reduce la dependencia de fertilizantes químicos y promueve la sostenibilidad agrícola (Bhattacharyya & Jha, 2012).

El amoníaco (NH_3) puede ser producido a partir de nitrógeno atmosférico y agua utilizando energías renovables, como la solar o eólica, en un proceso conocido como síntesis de amoníaco verde. El proceso comienza con la electrólisis del agua, donde el agua es descompuesta en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) mediante electrólisis, utilizando energía solar o eólica. El nitrógeno atmosférico (N_2) es fijado mediante un catalizador, como el hierro (Fe), para producir amoníaco.

El hidrógeno y el nitrógeno reaccionan en presencia de un catalizador, como el hierro o el rutenio (Ru), para producir amoníaco (Smith et al., 2020). El amoníaco verde puede ser utilizado como fertilizante o combustible alternativo en la industria camaronera. Otra manera de obtener el amoníaco es mediante la ya mencionada digestión anaerobia, donde a partir de biomasa o residuos de la localidad como excrementos de animales, desechos vegetales o de celulosa, lodos residuales, sueros de leche y demás desechos ricos en carbohidratos particularmente. Por acción de los microorganismos y su actividad catalítica, se produce una gasificación que comprende gases como el metano, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y el amoniaco, la mezcla de estos gases unifica al conocido biogás. Todo este proceso puede ser realizado en un biodigestor, no obstante, podemos replicar dicho proceso con materiales a nuestra disposición, improvisando un biorreactor realizado en una botella plástica recubierta con algún material que impida el paso de la luz hacia su interior donde se llevarán a cabo las reacciones de catálisis para dar lugar a los productos de gasificación mencionados.

El nitrógeno verde se obtiene a través de la recuperación y transformación de residuos orgánicos en formas asimilables por las plantas. Uno de los métodos más comunes es el compostaje, un proceso biológico en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica en presencia de oxígeno, produciendo un material estable y rico en nutrientes (Bernal et al., 2009). Durante el compostaje, el nitrógeno orgánico se mineraliza en formas inorgánicas, como amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), que son fácilmente absorbidos por las plantas. Otro proceso clave es la digestión anaeróbica, en la que los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de

oxígeno, produciendo biogás y digestato. El digestato es un fertilizante líquido rico en nitrógeno y otros nutrientes, que puede ser aplicado directamente en los cultivos (Möller & Müller, 2012), en este proceso se puede obtener tanto los fertilizantes líquidos ricos en nitrógeno y en la gasificación el amoniaco que puede ser transformado para producir úrea, otro fertilizante especificado, pero más refinado por su alto contenido de nitrógeno.

La urea ($CO(NH_2)_2$) puede ser producida a partir de amoníaco y dióxido de carbono (CO_2) en un proceso conocido como síntesis de urea. El proceso comienza con la reacción de amoníaco y CO_2 en un reactor a alta presión y temperatura, produciendo carbamato de amonio. El carbamato de amonio se descompone en urea y agua. La urea es purificada mediante cristalización o evaporación (Bhattacharyya & Jha, 2012).

El nitrógeno obtenido a partir de residuos y métodos de química verde puede ser utilizado en diversas aplicaciones que beneficien a la comunidad local. En la agricultura, los biofertilizantes ricos en nitrógeno pueden ser aplicados en cultivos de banano, cacao y otros productos agrícolas de la región, mejorando la fertilidad del suelo y reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos. Esto no solo aumenta la productividad agrícola, sino que también reduce el impacto ambiental asociado con el uso de fertilizantes sintéticos (Li et al., 2022).

El nitrógeno que se puede obtener a partir de los desechos mencionados puede ser significativamente competitivo frente a otros métodos empleados para su obtención. El aprovechamiento de residuos para la

obtención de algún producto o simplemente que mediante su transformación le podamos dar un uso adecuado, es el pilar fundamental para incentivar nuevas propuestas económicamente rentables y sostenibles ambientalmente.

3.5 Recuperación de nitrógeno a partir de lodos residuales

Los lodos residuales, generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR, Figura 14), son una fuente rica en nitrógeno, principalmente en forma de amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-). Además, los lixiviados de vertederos (LL), los lodos de compostaje (CPL) y los lodos de incineración (IPL) también contienen cantidades significativas de nitrógeno que pueden ser recuperadas.



Figura 14. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba, Cuenca, Ecuador.

Fuente: Autoría propia.

Los lixiviados de vertederos (LL) son líquidos que se generan cuando el agua percola a través de los residuos en los vertederos. Estos lixiviados contienen altas concentraciones de amonio (NH_4^+), especialmente en vertederos jóvenes (menos de 5 años), donde la concentración de NH_4^+ puede alcanzar hasta 2500 mg/L (Ersahin et al., 2023).

Los lodos de compostaje (CPL) se forman durante el proceso de compostaje de residuos orgánicos y generan lixiviados ricos en nitrógeno, principalmente en forma de amonio y nitratos, por otro lado, los lodos de incineración (IPL) son generados en plantas de incineración de residuos, contienen nitrógeno, aunque en menor cantidad comparado con los lixiviados de vertederos (Ersahin et al., 2023).

Estos residuos son considerados como recursos valiosos en el marco de la bioeconomía circular, ya que permiten la recuperación de nutrientes para su reutilización en la agricultura y otros sectores (Ersahin et al., 2023). Esta recuperación de los residuos o lodos residuales orgánicos se realizan mediante varias tecnologías, que incluyen procesos físicos, químicos y biológicos que se presentan a continuación.

3.5.1 Precipitación de estruvita

La estruvita es un compuesto cristalino que contiene nitrógeno (en forma de amonio), fósforo y magnesio. Este proceso es ampliamente utilizado para la recuperación simultánea de nitrógeno y fósforo de los lodos residuales y lixiviados, a partir de la siguiente reacción:

$$Mg^{+2} + NH_4{}^{+} + HPO_4{}^{-2} + 6H_2O \rightarrow MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O + H^{+} \qquad \textbf{Ec. 2}$$

El pH óptimo para la precipitación de estruvita está entre 8.5 y 9.5. Se requiere la adición de una fuente de magnesio (como $MgCl_2$ o MgO) y fósforo (como H_3PO_4) para alcanzar la estequiometría adecuada (Huang et al., 2014). Se realiza en reactores de precipitación, sistemas de agitación, y equipos de filtración para separar los cristales de estruvita. El costo de producción de estruvita oscila entre 140 y 630 USD/tonelada, dependiendo de los costos de los reactivos químicos (magnesio y fósforo) y la energía requerida (Lucero et al., 2022). La estruvita puede ser utilizada como fertilizante de liberación lenta en la agricultura, sustituyendo a los fertilizantes sintéticos convencionales.

3.5.2 Cultivos de microalgas

Las microalgas pueden absorber nitrógeno (en forma de amonio, NH_4^+) y fósforo (en forma de fosfato, PO_4^{3-}) de los lixiviados, produciendo biomasa que puede ser utilizada como biofertilizante. Produciendo la siguiente reacción química:

$$NH_4{}^{+} + CO_2 + H_2O \rightarrow Biomasa + O_2 \qquad \textbf{Ec. 3}$$

Las condiciones óptimas de operación de este proceso son un pH entre 7 y 9, temperaturas entre 20-30 °C (Saleem et al., 2022). Este proceso es clave para la producción de biomasa destinada para la generación de bioenergía y biofertilizantes ricos en nitrógeno destinados a mejorar la productividad de cultivos, los costos de este proceso varían dependiendo de la escala y los requerimientos de energía.

3.6 Valorización de proceso de obtención de urea a partir de amoniaco

La producción de urea a partir de amoniaco recuperado de los lodos residuales es uno de los procesos más prometedores, un enfoque que no solo cierra el ciclo del nitrógeno, sino que también transforma un residuo problemático en un producto de alto valor agregado.

3.6.1 Recuperación de amoniaco

El proceso comienza con la recuperación de amoníaco (NH_3) de los lodos residuales, un subproducto común de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Los lodos contienen una cantidad significativa de nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+), el cual puede ser convertido en amoníaco gaseoso mediante un proceso conocido como *stripping* de amoníaco. Este método consiste en elevar el pH de los lodos, generalmente añadiendo cal (CaO) o hidróxido de sodio (NaOH), para transformar el amonio en amoníaco gaseoso. La reacción química que describe este proceso es la siguiente:

$$NH_4^+ + OH^- \rightarrow NH_{3\,(g)} + H_2O \qquad \textbf{Ec. 4}$$

Posteriormente, el amoniaco gaseoso es separado de los lodos mediante la inyección de aire o vapor, y luego absorbido en una solución ácida, cómo ácido sulfúrico (H_2SO_4), para producir sulfato de amonio [$(NH_4)_2SO_4$], o en agua para obtener una solución de amoníaco (NH_4OH). La reacción con ácido sulfúrico es:

$$2NH_3 + H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4 \qquad \textbf{Ec. 5}$$

Este paso nos permite recuperar un recurso valioso, pero además reduce la carga de nitrógeno en los lodos, facilitando su deposición final o su uso como material de compostaje. El costo de este primer proceso oscila entre 50 y 100 USD por tonelada de amoníaco recuperado, dependiendo de la escala y eficiencia del sistema (Zhang & Liu, 2021).

3.6.2 Síntesis de urea

Una vez recuperado, el amoníaco se convierte en urea mediante un proceso químico bien establecido. La urea se sintetiza a través de la reacción del amoníaco con dióxido de carbono (CO_2) en dos etapas principales. En la primera etapa, el amoníaco y el CO_2 reaccionan a altas presiones (150-250 bar) y temperaturas (180-200 °C) para formar carbamato de amonio. La reacción es la siguiente:

$$2NH_3 + CO_2 \rightarrow NH_2COONH_4 \qquad \textbf{Ec. 6}$$

En la segunda etapa, el carbamato de amonio se descompone en urea y agua. Esta reacción ocurre en condiciones controladas de temperatura y presión:

$$NH_2COONH_4 \rightarrow CH_4N_2O + H_2O \qquad \textbf{Ec. 7}$$

La mezcla resultante se purifica y concentra mediante evaporación y cristalización, obteniendo urea en forma sólida o líquida, lista para su uso como fertilizante. Este proceso, aunque requiere un consumo significativo de energía, es altamente eficiente y permite reciclar el amoníaco y el CO_2 no reaccionados, maximizando la conversión y minimizando los residuos. El costo de producción de urea a partir de amoníaco recuperado oscila entre 200 y 300 USD por tonelada,

mientras que su precio de venta en el mercado puede alcanzar 350 a 450 USD por tonelada, generando una utilidad neta de 50 a 150 USD por tonelada (Liu et al., 2013).

CAPÍTULO IV

4. HIDRÓGENO

4.1 Definición de hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más ligero y abundante en el universo, con un número atómico de 1 y una masa atómica de aproximadamente 1.008 u. En condiciones normales, el hidrógeno es un gas incoloro e insípido, que se presenta como moléculas diatómicas (H_2). Este elemento es altamente reactivo y se combina fácilmente con otros elementos, lo que lo convierte en un portador de energía prometedor (Milanese et al., 2019).

Su alta densidad energética, que es aproximadamente tres veces mayor que la de la gasolina, lo hace atractivo para aplicaciones en el sector energético, especialmente en la transición hacia fuentes de energía más limpias (Bockris, 2013). El hidrógeno puede producirse a partir de diversas fuentes, como combustibles fósiles, biomasa y agua, lo que lo convierte en un vector energético versátil en la transición hacia una economía baja en carbono y como combustible, su capacidad calorífica es significativamente mayor que la de los combustibles fósiles tradicionales, con un poder calorífico inferior (PCI) de 120 MJ/kg, comparado con los 44 MJ/kg de la gasolina (Zhang et al., 2021).

El hidrógeno desempeña un papel crucial en la descarbonización de sectores difíciles de electrificar, como la industria pesada y el transporte de larga distancia (IRENA, 2020). En este contexto, el hidrógeno se presenta como una solución viable, ya que puede ser utilizado en la

producción de electricidad y como materia prima en procesos industriales, la cual es un modelo más sostenible y crucial para mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de combustibles fósiles (IEA, 2022). La capacidad del hidrógeno para almacenar y transportar energía, lo convierte en un componente clave en la integración de energías renovables intermitentes en la red eléctrica (Salcedo, 2020).

La producción mundial de este elemento ronda entre los 44.5 y 50 millones de toneladas al año, representa aproximadamente el valor de 2% de la demanda de energía primaria. En la actualidad, los Estados Unidos produce 9 millones de ton/año de H_2 producido por las grandes industrias y de origen de combustibles fósiles, principalmente del gas natural.

El 60% de esta generación, es utilizado en la fabricación de otros compuestos tales como el amoniaco, síntesis del metanol, refinamiento de petróleo, etc (Pasquevich, 2004; Balat, 2008). Además, su integración en la síntesis de combustibles sintéticos y en la reducción directa de hierro para la producción de acero lo posiciona como un elemento central en la descarbonización de sectores industriales intensivos en carbono (Bhandari et al., 2020).

4.2 Hidrógeno verde

El concepto de hidrógeno renovable (verde), fue utilizada en Estados Unidos por primera vez, por el *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) o Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos en el año de 1995, el cual al hidrógeno verde se lo define como aquel producido a través de energías renovables. Otra de las

definiciones establecidas al hidrógeno verde fue otorgado por el consenso Europeo en el marco del proyecto CertifHy en el trabajo publicado con el título *Technical Report on the Definition of "Green" Hydrogen*, el cual indica que es proveniente a partir de fuentes renovables con una intensidad baja de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Barth et al., 2015).

En base a estas definiciones, se puede concluir que el hidrógeno elaborado a partir de biomasa es neutro en CO_2 y puede definirse como verde, ya que, según la definición general, el hidrógeno debe tener ausencia de emisiones de dióxido de carbono y obtenido de tecnologías que usan fuentes renovables (Squadrito et al., 2023).

Tabla 1. Tecnologías de hidrógeno verde, principales características ambientales.

Tecnología de Producción	**Ventajas**	**Desventajas**
Reformado con vapor de materias primas biológicas	No necesita oxígeno; alta eficiencia de conversión; tecnología conocida ya utilizada para el gas natural.	Aunque es carbono neutral, hay emisiones de CO_2 y CO.
Gasificación de biomasa	Biomasa residual y de desecho como materia prima.	Aunque es carbono neutral, hay emisiones de CO_2, por lo que se solicita un tratamiento posterior de los gases de salida y residuos.
Pirólisis de biomasa	Residuos con bajo contenido de agua y biomasa residual como	Aunque es carbono neutral, hay emisiones de CO_2 y CO, formación de

	materia prima; no se necesita oxígeno.	TAR que debe ser tratada y no es fácil de gestionar.
Electrólisis del agua	No hay emisiones directas; el oxígeno es un subproducto.	Se necesita electricidad verde de bajo costo; baja eficiencia de conversión (alrededor del 60%); se solicita agua pura.
Producción directa por procesos biológicos	Se podría utilizar una gran variedad de residuos como materia prima; posibilidad de utilizar CO_2 como materia prima complementaria; posibilidad de producir subproductos útiles.	Tecnología en bajo nivel de desarrollo; baja densidad de producción; pretratamiento de la materia primera requerido para adecuarse a las necesidades de los microorganismos aplicados.

Fuente: Squadrito (2023).

Este tipo de hidrógeno no solo reduce la dependencia de combustibles fósiles, sino que también promueve el uso eficiente de los recursos biológicos, cerrando el ciclo de producción y consumo (Emam & Özcan., 2020). La producción de hidrógeno a partir de biomasa y residuos orgánicos no solo contribuye a la sostenibilidad, sino que también puede generar beneficios económicos al crear nuevos mercados y oportunidades de empleo en el sector de la energía renovable (Chaubey et al., 2013), ya que existen múltiples procesos de conversión por medio de métodos como la *Alkaline Electrolysis* (AEL) o electrólisis alcalina, *Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis* (PEM) o Electrólisis de electrolito de membrana de polímero y *Solid Oxide Electrolysis* (SOEL) o Electrólisis de óxido sólido (Piñeres, 2021).

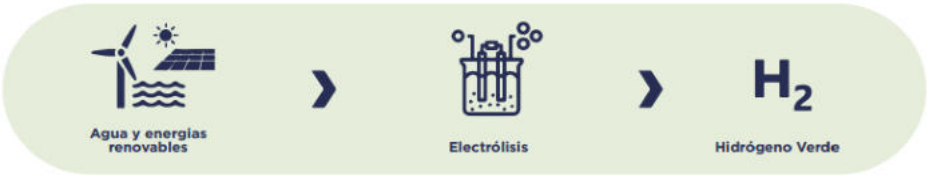


Figura 15. Principales formas de producción de hidrógeno y su clasificación por colores.

Fuente: Adaptado de Schlegel (2021).

Tabla 2. Comparación de los tipos de electrólisis para la producción de hidrógeno.

Parámetro	**AEL**	**PEM**	**SOEL**
T (°C)	60 - 90	50 - 80	700 - 900
P (Bar)	11 - 30	20 - 50	1 - 15
J A/m2	0.25 - 0.45	1.0 - 2.0	0.3 - 1.0
Eficiencia (%)	51 - 60	46 - 60	76 - 81
Costos Inversión €/kW	800 - 1500	1400 - 2100	>2000
Producción H2 Nm3/h	1400	400	<10
Tiempo de durabilidad (h)	55 - 120	60 - 100	3 - 50

Costos de inversión €/kW	800 - 1500	1400 - 2100	>2000
Tecnología	Comercial	Inicio comercial	Investigación

Fuente: Buttler & Spliethoff (2018).

4.3 Hidrógeno azul

Según Velazquez Abad & Dodds (2020), el hidrógeno azul es un concepto mixto con el fin de descarbonizar la producción de hidrógeno gris (hidrógeno actual). Se define hidrógeno azul cuando las emisiones de los gases de efecto invernadero son bajas gracias a la captura y almacenamiento de carbono mediante la implementación tecnológica o *Carbon Capture and Storage* (CSS) en comparación con la producción convencional, logrando así, reducir hasta un 95% las emisiones de (CO_2).



Figura 16. Principales formas de producción de hidrógeno y su clasificación por colores.

Fuente: Adaptado de Schlegel (2021).

4.4 Hidrógeno gris

Es hidrógeno producido a partir de gas natural o de otros hidrocarburos ligeros tales como el metano o gases licuados de petróleo mediante procesos de reformado (Zuriaga, 2021). Algunos métodos de: Reformación de metano con vapor o *Steam Methane Reforming* (SMR), *Partial Oxidation* (POX) u Oxidación parcial y el Reformado autotérmico o *Autothermal Reforming* (ATR) (Haines et al., 2019).

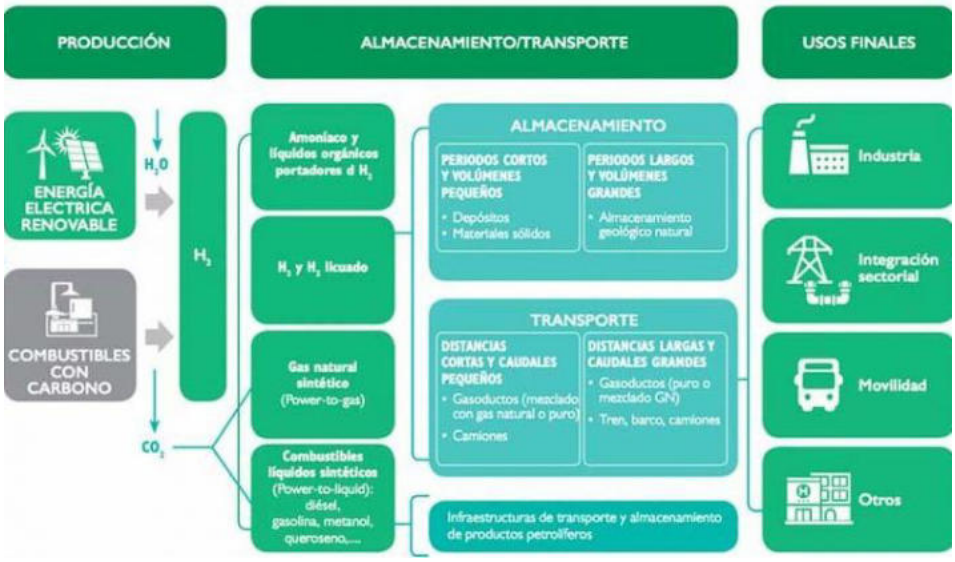


Figura 17. Etapas de la cadena de valor del Hidrógeno.

Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España (2020).

4.5 Hidrógeno a partir de metano

4.5.1 Reformado de metano con vapor

El reformado con vapor de metano (SMR) es el método más común para producir hidrógeno a partir de metano. Este proceso implica la reacción de metano con vapor de agua a elevadas temperaturas que oscilan entre 700°C y 1000°C, esto mediante la presencia de un catalizador de níquel, el cuál logra la obtención de hidrógeno y monóxido de carbono (CO) (Zhang et al., 2021). El proceso se lleva a cabo en un reformador, donde el vapor de agua y el metano, reaccionan a una presión y temperatura alta, la ecuación 8 indica la primera etapa, donde el metano se transforma en un gas de síntesis (H_2 y CO) (Galvis, 2014).

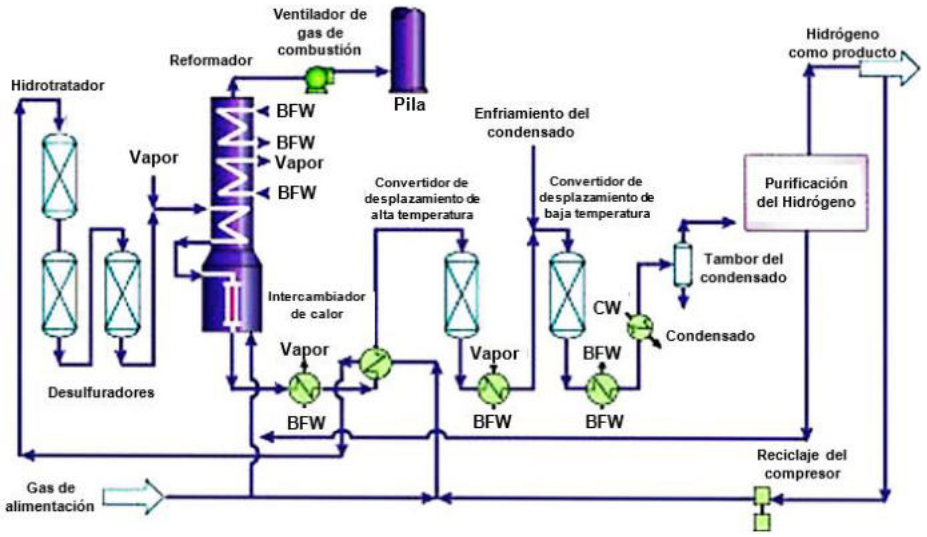


Figura 18. Diagrama de flujo del proceso de reformado con vapor de agua.

Fuente: Chemistry Engineering Processing - Chero (2018).

A partir del monóxido de carbono se puede obtener más hidrógeno mediante una segunda etapa, la cual es la ecuación 9, siendo esta la reacción de desplazamiento de vapor de agua o *Water Gas Shift* (WGS) (Galvis, 2014).

$$CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO \qquad \boldsymbol{Ec.8}$$

$$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2 \qquad \boldsymbol{Ec.9}$$

Este proceso, aunque sea eficiente, genera emisiones significativas de dióxido de carbono, lo que, en términos de sostenibilidad, se plantean desafíos a largo plazo (Bhandari et al., 2020). Se han desarrollado tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CAC) que pueden integrarse con el SMR, con el objetivo de mitigar este impacto ambiental, permitiendo la producción de hidrógeno azul, considerado una opción más sostenible (Fan & Friedmann, 2021). Un punto interesante para el reformado húmedo de metano es el rendimiento a hidrógeno (Ec. 10), definido como el ratio entre los moles de hidrógeno presentes en el efluente de gas y los moles de hidrógeno teóricos que pueden obtenerse con el reformado completo (Rioche et al., 2005).

$$Rendimiento\ H_2(\%) = \frac{moles\ de\ H_2\ obtenidos}{\left(2n + \frac{m}{2} + k\right) \cdot moles\ de\ C\ en\ alimentación} \cdot 100\% \qquad \boldsymbol{Ec.10}$$

4.5.2 Oxidación parcial

Este proceso rápido, pero no tan eficiente como el reformado con vapor de metano, sucede dentro de un reactor (reformador) a temperaturas muy elevadas, obteniéndose gas de síntesis, debido a que durante el proceso, el hidrocarburo tiene una combustión incompleta; es decir, la cantidad de oxígeno que reacciona es menor a la necesaria para la reacción (Haines et al., 2019). La reacción general del proceso POX en hidrocarburos es planteada en la siguiente ecuación (11) (Galvis Escobar, 2014).

$$C_nH_m + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow nCO + calor \qquad \textbf{Ec. 11}$$

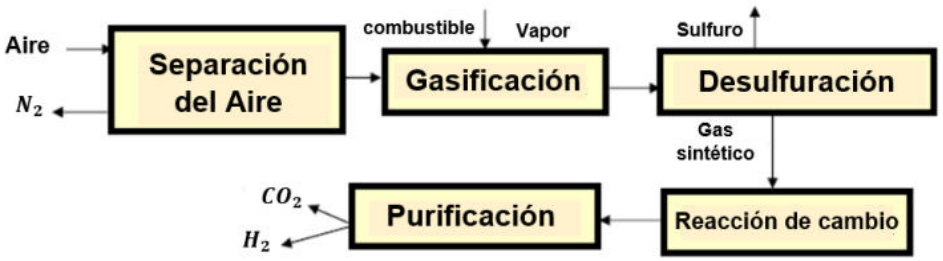


Figura 19. Diagrama de flujo de la producción de hidrógeno mediante oxidación parcial de hidrocarburos.

Fuente: Fernández & Bolaños (2005).

4.5.3 Reformado autotérmico

Es una técnica que combina la oxidación parcial del metano con el reformado con vapor, permitiendo un balance térmico más eficiente y una disminución significativa de producción de dióxido de carbono en comparación con el SMR (Chaubey et al., 2013). Al igual que el

proceso SMR, el ATR produce gas de síntesis a través de la oxidación parcial del hidrocarburo a reformar (Piñeres, 2021). La materia prima del ATR puede ser la gran mayoría de hidrocarburos (Vásquez & Salinas, 2018).

Este proceso se lleva a cabo a través de condiciones controladas, lo que facilita la producción de hidrógeno de alta pureza y reduce la necesidad de energía externa y únicamente con un reactor (Rostrup - Nielsen et al., 2002). No obstante, la implementación de esta tecnología todavía se topa con obstáculos en cuanto a costos y escalabilidad, lo que demanda más investigación y desarrollo para mejorar su desempeño y factibilidad financiera (Eicke, 2022)



Figura 20. Proceso de reformado autotérmico.

Fuente: Lázaro (2023).

4.5.4 Reformado con dióxido de carbono (Dry Reforming) o reformado seco de metano

El proceso de reformado seco del metano implica su interacción con el CO_2 para generar monóxido e hidrógeno (Ec. 12). El proceso de reformado seco, también conocido como "*dry reforming*", puede utilizarse para otros hidrocarburos y compuestos orgánicos que se encuentran en los vapores y gases de pirólisis (Zhao et al., 2017).

$$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO + 2H_2 \qquad \boldsymbol{Ec.12}$$

En el proceso de reformado seco se llevan a cabo dos procesos distintos, la descomposición del CH_4 y la disociación del CO_2. La primera se produce usualmente en la fase activa del catalizador, generando hidrógeno y carbón. El carbón generado puede oxidarse a partir del oxígeno existente en el soporte catalítico y, en la falta de oxígeno, generar depósitos de carbón en el catalizador (Álvarez-Falcón, 2005). Respecto a la disociación del CO2, este se adsorbe de manera preferente en el soporte y próximo a la partícula metálica, disociándose para producir CO y oxígeno (López, 2016).

Esta respuesta presenta múltiples beneficios sobre el reformado húmedo de metano. Primero, existe una relación de unidad entre el gas de síntesis. En segundo lugar, la aplicación del dióxido de carbono representa una vía atractiva para la reducción de dióxido de carbono originado de fuentes humanas y, en tercer lugar, favorece la transformación de metano, que anteriormente era un elemento de los desechos de las reservas de petróleo, en metano, una materia prima que se convierte en económicamente interesante (Gamman et al., 1998).

4.5.4.1 Catalizadores para el reformado seco de metano

En las décadas recientes, el proceso de RSM ha ganado relevancia y los esfuerzos se han centrado en la creación de catalizadores con alta actividad y que sean resistentes a la formación de coque, manteniendo un funcionamiento estable a largo plazo (López, 2016).

Catalizadores con metales de alta calidad, tales como: Los catalizadores Pt, Rh y Pd han demostrado ser activos y estables en la reacción de reformado seco de metano. No obstante, estos resultan costosos para su uso práctico (Asami et al., 2003). Desde una perspectiva industrial, el níquel se utiliza más debido a su mayor competitividad económica, sin embargo, tienden en la formación de depósitos de carbono (López, 2016).

4.5.5 Reformado seco y húmedo

Otra opción para la obtención de metano es el reformado combinado húmedo y seco. Choudhary et al. (1996) observó una rápida deposición de coque en el catalizador durante el proceso de reformado seco de metano en un catalizador de NiO-CaO (Óxido de Níquel - Óxido de Calcio) a 700-850 grados Celsius. No obstante, cuando se realiza reformado seco y húmedo al mismo tiempo, la deposición de coque disminuye considerablemente. Además, el ratio H_2/CO en el gas producto puede modificarse manipulando la concentración relativa de vapor y CO_2 en la alimentación (Álvarez, M., 2016).

4.5.6 Steam iron

El proceso de Steam Iron es uno de los métodos más antiguos de producción de hidrógeno. Es un proceso cíclico de la descomposición del agua, mediante el cual el carbón es consumido. Este carbón se gasifica hasta obtener un gas reductor pobre, que contiene hidrógeno y monóxido de carbono. Este gas reacciona con óxidos de hierro (Hematita Fe_2O_3, magnetita Fe_3O_4, wustita FeO) para producir una forma reducida de óxido de hierro (wustita FeO y Hierro Fe). El óxido reducido se re-oxida con vapor para formar magnetita e hidrógeno (Hacker et al., 2000). El equipo necesario para este proceso incluye reactores de lecho fluidizado y sistemas de captura de CO_2 (Guo et al., 2020).

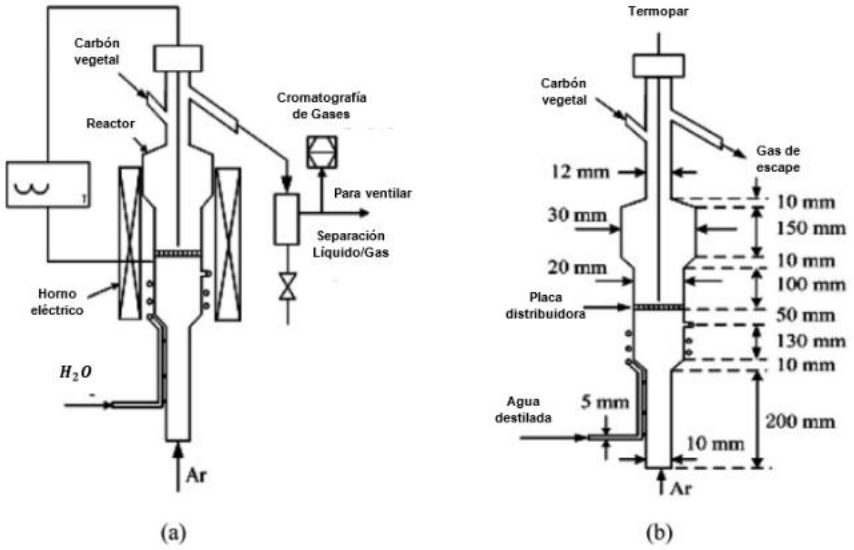


Figura 21. (a) Diagrama esquemático del sistema de reacción y (b) detalles del reactor de lecho fluidizado.

Fuente: Yang et al. (2008).

Este proceso apareció por primera vez a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX con el objetivo de producir hidrógeno a partir de carbón gasificado, principalmente para su uso en navegación aérea (Messerschmitt, 1911). El proceso opera en dos etapas: la primera etapa es la etapa de reducción, durante esta etapa, los minerales de hierro se reducen mediante gas de síntesis o de biomasa, que de este modo se oxida un gas pobre con un bajo contenido de CO restante (6-8%) y de hidrógeno (6%). Posteriormente, en el paso de oxidación, el mineral de hierro es re-oxidado con vapor de agua, lo que produce un gas rico en hidrógeno, esto se muestra en la figura 22. Dependiendo de la temperatura de la operación, el vapor de agua se convierte cerca del 28% en hidrógeno durante la oxidación (Hacker et al., 2000). A continuación, las reacciones gas - sólido (reacciones heterogéneas) (Jannach et al., 1996) (Hacker et al., 1998).

Hematita a Magnetita

$$3Fe_2O_3 + H_2 \leftrightarrow 2Fe_3O_4 + H_2O \qquad \boldsymbol{Ec.13}$$

Magnetita a Wustita

$$1.202Fe_3O_4 + H_2 \leftrightarrow 3.897Fe_{0.947}O + H_2O \qquad \boldsymbol{Ec.14}$$

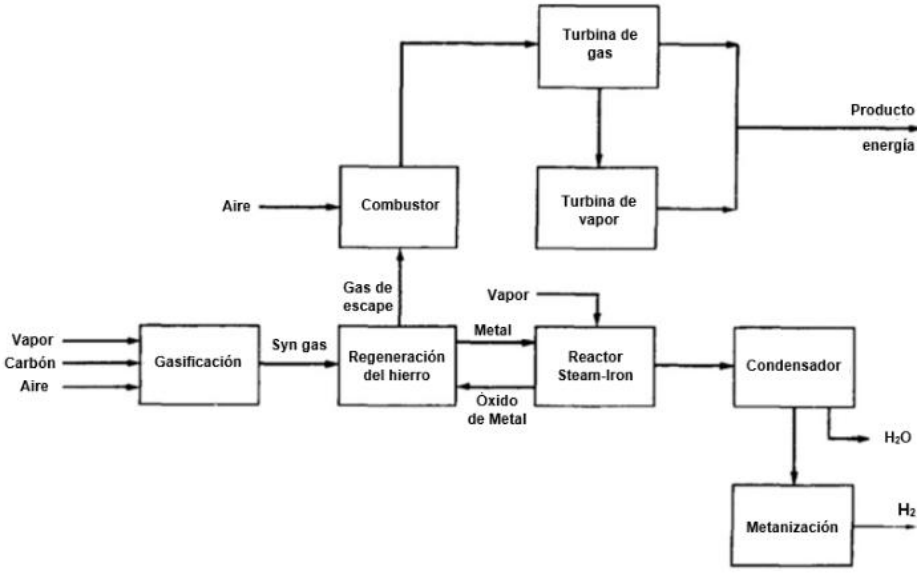


Figura 22. Diagrama de flujo simplificado de la producción de hidrógeno a partir del proceso Steam Iron.

Fuente: Steinberg & Cheng (1989).

Una de las ventajas clave del proceso *Steam Iron* es su capacidad para almacenar y liberar hidrógeno de manera cíclica, lo que lo hace ideal para aplicaciones de almacenamiento de energía a largo plazo. Además, el hierro utilizado en el proceso es abundante y económico, lo que reduce los costos asociados con la producción de hidrógeno (Bauer et al., 2022). Sin embargo, el proceso requiere altas temperaturas (800-1000 °C) y puede sufrir de degradación del material con el tiempo, lo que plantea desafíos para su implementación a gran escala (IRENA, 2020). El hidrógeno generado tendrá una pureza adecuada (99,9 vol%). Sólo se puede considerar puro el hidrógeno obtenido de esta manera si el óxido de hierro reducido no está contaminado con sustancias que posean carbono (Chaubey et al., 2013).

4.6 Hidrógeno a partir de biomasa

La biomasa es una fuente renovable de energía que incluye materiales orgánicos como residuos agrícolas, forestales, urbanos y cultivos energéticos. Estos materiales pueden ser convertidos en hidrógeno mediante procesos termoquímicos o biológicos, ofreciendo una alternativa sostenible a los combustibles fósiles (IEA, 2022). Los residuos agrícolas, como paja y cáscaras, y los residuos forestales, como astillas y ramas, son fuentes abundantes y de bajo costo para la producción de hidrógeno. Además, los residuos urbanos, como los desechos orgánicos y el lodo de aguas residuales, representan una oportunidad para gestionar residuos mientras se produce energía (Li et al., 2021).

La producción de hidrógeno a partir de biomasa no solo reduce la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también contribuye a la gestión sostenible de residuos y a la reducción de emisiones de carbono. Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2020), la biomasa puede desempeñar un papel clave en la transición hacia una economía baja en carbono, especialmente en regiones con recursos agrícolas y forestales abundantes. Además, el uso de biomasa residual evita la competencia con la producción de alimentos, lo que es un desafío común en el uso de cultivos energéticos (Bauer et al., 2021).

En el contexto de la bioeconomía circular, la producción de hidrógeno a partir de biomasa promueve la eficiencia en el uso de recursos y la creación de cadenas de valor sostenibles. Por ejemplo, los residuos

agrícolas y forestales pueden ser convertidos en hidrógeno y otros productos útiles, como biochar y biocombustibles, creando ciclos de producción cerrados (Zhang et al., 2021). Este enfoque no solo reduce las emisiones de carbono, sino que también fomenta la resiliencia económica y la seguridad energética (IRENA, 2020).

4.6.1 Gasificación de la biomasa

La gasificación es un procedimiento químico que transforma un material con alto contenido de carbono (tales como carbón, petróleo o biomasa) en una combinación gaseosa conocida usualmente como "syngas", que incluye CO, H_2 y CO_2 y otras sustancias gaseosas (Squadrito, 2023). Se conoce y se utiliza este procedimiento desde el siglo XIX, cuando se empleaba principalmente para proveer el gas urbano, una combinación de hidrógeno (cerca del 50%), monóxido de carbono del 3 al 6% y el remanente como metano y dióxido de carbono (Widjaya et al., 2018).

La producción de gas metropolitano se realizaba bajo condiciones extremas: 30 bares o más, y temperaturas de hasta 1200 °C (Midilli et al., 2021). El procedimiento implica la quema de la materia prima bajo condiciones de escasez de oxígeno (por eso se le llama "oxidación parcial") y en presencia de vapor; generalmente se lleva a cabo a temperaturas que oscilan entre 700 y 800 °C (Bhutto et al., 2013).

Y su meta principal es incrementar la producción de gases y alcanzar un rendimiento elevado de hidrógeno (Widjaya et al., 2018). Si se emplea biomasa como sustancia prima, el procedimiento resulta neutro

en carbono y el hidrógeno que se obtiene de la depuración de los gases de emisión es verde (Squadrito, 2023).

Para la gasificación, se utiliza un sistema de calentamiento para generar calor, al que se lo denomina gasificador, un dispositivo de potencia que purifica el gas y es un transformador de energía, usualmente un motor o turbina (Estrada & Zapata, 2004). En este procedimiento, la mayor dificultad radica en el filtrado del "gas producido", que se necesitan aparatos capaces de trabajar con gases a altas temperaturas, con partículas suspendidas de diversas clases y en ocasiones grandes cantidades de masa (Turare, 1997).

4.6.2 Pirólisis y obtención de hidrógeno

La pirólisis implica la degradación de un combustible sólido (como carbón o biomasa) a través de la acción térmica (usualmente a aproximadamente 450°C para la biomasa y 1.200°C para el carbón) cuando no hay oxígeno disponible. Los resultados finales de este procedimiento dependen del tipo de combustible utilizado, la temperatura y la presión en el funcionamiento y los periodos de permanencia de los componentes en la unidad. Los productos obtenidos en su mayoría son: Gases que contienen hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono, líquidos de hidrocarburos y desechos carbonados, también conocidos como coque (Pino, 2009), además, la eficacia de la producción de hidrógeno mediante pirólisis depende del tipo de catalizador (Moud et al., 2018; Waheed et al., 2016). Uno de los mayores beneficios de la pirólisis es su capacidad para utilizarse en diferentes materias primas, mientras que su limitación radica en los

altos requerimientos de energía; para ello, emplean los siguientes reactores para la pirólisis: lecho fluidizado (fluidlized bed) como la figura 23, lecho fluidizado con circulación (*fluidlized bed with circulation)* y reactor de flujo de arrastre (*entrained flow reactor*) (Bridgwater, 1999).



Figura 23. Reactor de lecho fluidizado comercial.

Fuente: Canaan (2024).

Una aplicación de este bioproceso sucedió en el suroeste de Georgia, Estados Unidos, ya que se le había reconocido a la zona como de gran importancia en la agricultura, la industria de productos de la selva y la demanda de combustibles para el transporte ecológico en la región de Atlanta. Scientific Carbons Inc. de Blakely, GA, emplea como materia prima cáscaras de maní peletizadas. Se alimentan hasta 1000 kg/hora de cáscaras densas de cacahuete mediante un proceso de dos fases que genera carbón activado. Los subproductos de vapor de la primera etapa,

la pirólisis, se utilizan actualmente como combustible para el generador de vapor (Evans et al., 2002). En la figura 24 se muestra cómo se realiza el proceso de obtención del ejemplo de Georgia.

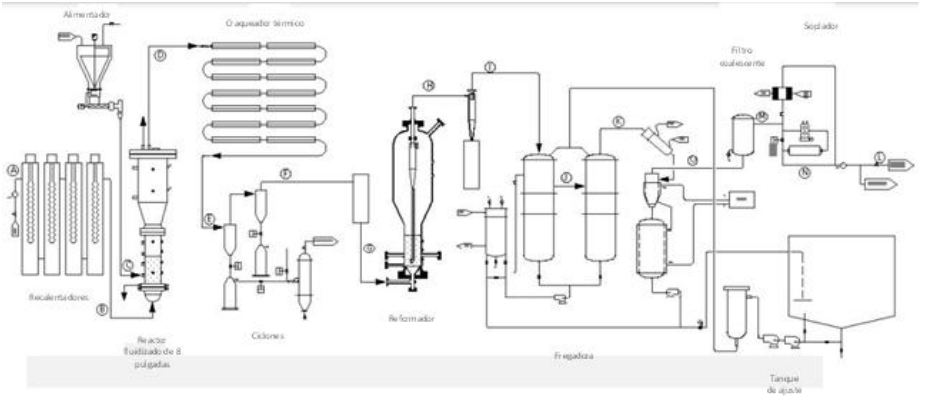


Figura 24. Hoja de flujo del proceso para la puesta a punto del reactor de reformado con vapor en la Unidad de Desarrollo de Procesos Termoquímicos.

Fuente: Evans et al. (2002).

4.6.3 Fotofermentación

La fotofermentación es la etapa en la que los ácidos orgánicos se transforman en hidrógeno y dióxido de carbono mediante la fotosíntesis, gracias a la existencia de tipos de bacterias anaerobias: *Rhodobacter, Rhodobium, Rhodopseudomonas y Rhodospirillum* (He et al., 2005). Bacterias fotosintéticas como *Rhodobacter spheroides* (Eroglu et al., 1999; Federov et al., 1998*)*, *Rhodobacter capsulatus* (He et al., 2005; Fang et al., 2005), *Rhodovulum sulfidophilum W-1S* (Maeda et al., 2003) *y Rhodopseudomonas palustris* (Barbosa et al., 2001*)* producen hidrógeno en presencia de la enzima nitrogenasa utilizando energía luminosa y ácidos orgánicos (por ejemplo, acetato,

lactato, butirato, malato, etc.) o biomasa en estanques abiertos o fotobiorreactores. La investigación relativa a la fotofermentación suele implicar la fermentación oscura (Lukajtis et al., 2018). La ecuación global (Ec.15) otorgada por Chaubey et al., (2013) es la siguiente:

$$C_6H_{12}O_6 + 12H_2O \rightarrow Energía\ lumínica + 12H_2 + 6CO_2 \qquad \boldsymbol{Ec.15}$$

Un ejemplo de este proceso es la empresa Wageningen UR ha desarrollado un procedimiento para la generación de hidrógeno que implica dos fermentaciones sucesivas (Figura 25). Los beneficios particulares del bioproceso incluyen la generación a pequeña escala de hidrógeno derivado de biomasa húmeda (Fernández & Bolaños, 2005).

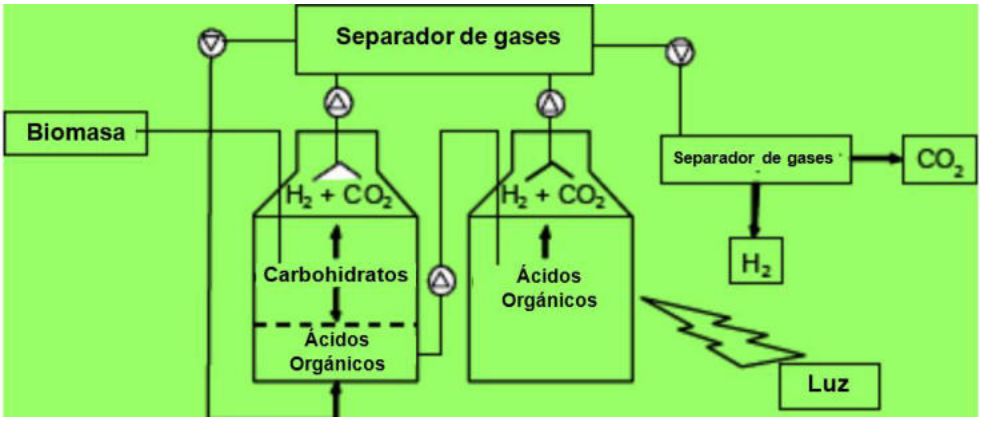


Figura 25. Bioproceso de producción de hidrógeno a partir de la biomasa.

Fuente: Adaptación de Fernández & Bolaños (2005).

La primera fermentación es llevada a cabo por una bacteria termofílica a una temperatura de 70°C. Los niveles habituales de gases de escape

oscilan entre el 50% en la primera fermentación y más allá del 85% en la segunda. Estos gases de escape tienen la capacidad de alimentar directamente una célula PEM de combustible. La bacteria termofílica genera hidrógeno de manera independiente en glucosa, xilosa, oligosacáridos y almidón. La celulosa tiene la capacidad de fermentarse en hidrógeno con un bajo índice de conversión (Fernández & Bolaños, 2005).

Es imprescindible realizar pretratamientos de hidrólisis para utilizar biomasa lignocelulósica. En el proceso de fermentación de una bacteria termofílica, como la *Caldicellulosiruptor saccharolyphilic*, se generan subproductos como el ácido acético y, en una proporción mucho menor, el ácido láctico. Los ácidos están preparados para ser transformados en hidrógeno y CO2 por una bacteria fotoheterotrófica, como la *Rhodobacter capsulatus*, a temperatura ambiente y bajo la acción de la luz (Férnandez & Bolaños, 2005).

4.6.4 Acerca de los costos de producción de hidrógeno verde y azul

La Tabla 3 nos indica los variados costos del hidrógeno de color verde, azul y gris. Los procedimientos de SMR, gasificación de carbón y biomasa son las técnicas más lucrativas para la producción de hidrógeno en la actualidad. El precio del hidrógeno verde se relaciona entre un 50 y 80% con el costo de la electricidad para las energías renovables.

Tabla 3. Costos de producción de hidrógeno verde y azul mediante sus procesos.

Fuente de energía	Proceso	Costo (USD/kgH_2)
Gas Natural	SMR	2.08
Gas Natural	SMR + CSS	2.27
Carbón	Gasificación	1.34
Carbón	Gasificación + CSS	1.63
Biomasa	Gasificación	1.77 - 2.05

Fuente: Adaptado de Kayfecci et al. (2019).

4.7 Demanda del hidrógeno

4.7.1 Demanda mundial de hidrógeno

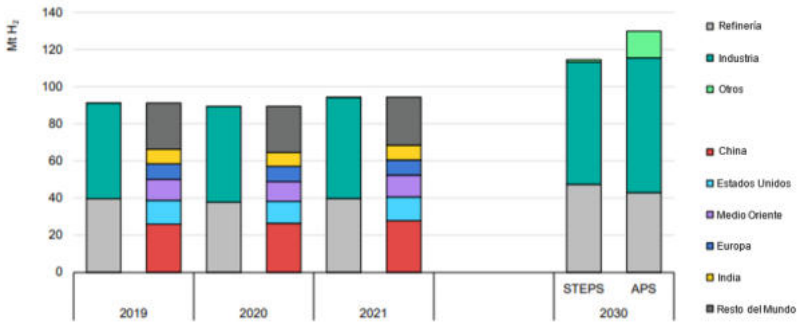


Figura 26. La demanda mundial de hidrógeno aumentó un 5% en 2021, como reflejo de la recuperación de la actividad económica en aplicaciones tradicionales tras los recorres relacionados con la pandemia.

Fuente: IEA (2022).

En 2021, la necesidad global de hidrógeno superó los 94 millones de toneladas (Mt), lo que representa un incremento del 5% en relación al año previo y en relación con las 91 Mt de 2019 (nivel prepandemico). El mayor incremento se atribuyó al empleo de hidrógeno en usos tradicionales, particularmente en productos químicos, con un incremento de casi 3 Mt, y en refinado, con un incremento cercano a 2 Mt en relación a 2020. Estos subsectores, especialmente el refinado, sufrieron un gran impacto debido a la pandemia del Covid-19. La actividad que se detuvo debido a los cierres y la ralentización económica global comenzó a retomarse en 2021, lo que evidencia el incremento en la demanda de hidrógeno (IEA, 2022).

La necesidad de hidrógeno para usos emergentes, tales como la industria pesada, el transporte, la producción de energía, los sectores de la construcción o la fabricación de combustibles basados en hidrógeno, era muy limitada en 2021, aproximadamente 40 kilotoneladas (kt) de H_2 (equivalente al 0,04% de la demanda global de hidrógeno) (IEA, 2022).

China es el principal consumidor a nivel global, con una demanda para 2021 cercana a los 28 Mt de H_2, un incremento del 5% respecto a 2020. El segundo país con mayor consumo es Estados Unidos y el tercero es el Medio Oriente, con cerca de 12 millones de toneladas de H2 cada uno, registrando un incremento de la demanda en 2021 del 8% y el 11%, respectivamente, en comparación con 2020. Europa se sitúa como el cuarto mayor consumidor, con una demanda que supera los 8 Mt H_2 en 2021, casi igual que en 2020. La India le sigue, con una demanda de 8 Mt de H_2, un incremento del 7% respecto al año previo, debido a la

recuperación económica del refinamiento y, principalmente, de la producción de acero, dos industrias fuertemente impactadas por la pandemia en el 2020 (IEA, 2022).

La situación política actual se muestra en el panorama de políticas declaradas de la IEA (STEPS), que se basa en una evaluación sector por sector de las políticas concretas en vigor, así como de las propuestas por los gobiernos a nivel global. Las proyecciones de STEPS indican que la necesidad de hidrógeno podría llegar a 115 Mt para el año 2030. Las proyecciones para la demanda de hidrógeno en la APS se estiman en 130 Mt para 2030, siendo aproximadamente el 25% correspondiente a aplicaciones emergentes y al empleo de hidrógeno de bajas emisiones en usos convencionales. Esto requeriría una transformación drástica para impulsar la demanda de hidrógeno, respaldada por políticas audaces y específicas (IEA, 2022).

4.7.2 Demanda mundial de biohidrógeno

La demanda global de hidrógeno verde ha experimentado un crecimiento exponencial en la última década, impulsada por políticas climáticas y compromisos de neutralidad de carbono. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2022), la demanda mundial de hidrógeno alcanzó los 94 millones de toneladas en 2021, con un crecimiento proyectado del 6% anual hasta 2030. La Figura 27 representa la oferta y demanda global de hidrógeno, en la que se destacan las principales fuentes de energía primaria como la oferta para generar hidrógeno, mientras que en la demanda se destacan las diversas aplicaciones previamente citadas (Piñeres, 2021).

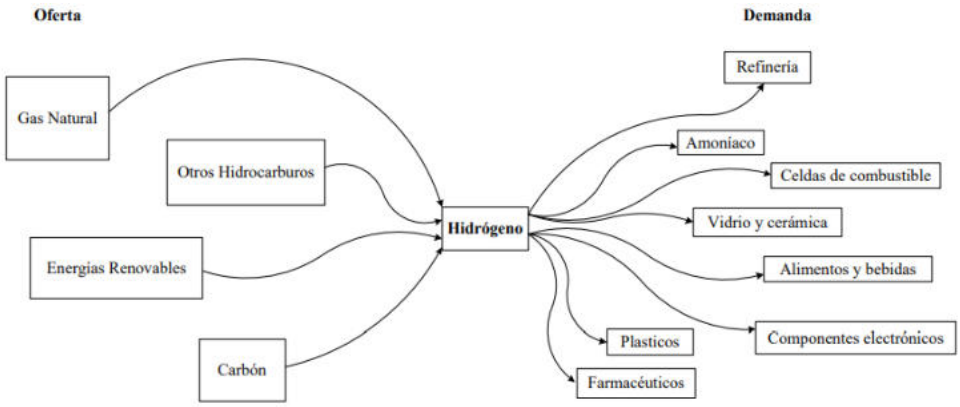


Figura 27. La oferta y la demanda mundial promedio de hidrógeno.

Fuente: Bakenne et al. (2016).

4.7.3 Demanda europea de biohidrógeno

Europa se ha posicionado como líder en la adopción de hidrógeno verde, con una demanda de 12.5 millones de toneladas en 2021. La estrategia de la Unión Europea para el hidrógeno prevé una inversión de 470 mil millones de euros para 2050, con el objetivo de alcanzar una capacidad instalada de 40 GW de electrolizadores (European Commission, 2020).

En España, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) define metas para el periodo 2021-2030. Por otro lado, la Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra, plantea la ruta para lograr la meta de neutralidad climática para el año 2050, a través del aumento de las absorciones por sumideros que facilitarán la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (Zuriaga, 2021).

4.7.4 Demanda asiática de biohidrógeno

Asia representa más del 50% de la demanda global de hidrógeno, liderada por China, Japón y Corea del Sur. China, en particular, ha anunciado planes para producir 100,000 toneladas de hidrógeno verde anuales para 2025 (Zhang et al., 2020).

4.7.5 Demanda sudamericana de biohidrógeno

El potencial para generar hidrógeno verde toma en cuenta diversas variables de importancia. Esto abarca las particularidades del mercado dinámico de cada territorio, la capacidad de instalación, la factibilidad de los procedimientos tecnológicos y la presencia de recursos renovables para producir energía (Montenegro et al., 2019)

Sudamérica ha comenzado a explorar su potencial en hidrógeno verde, con proyectos piloto en Chile y Brasil. La demanda regional en 2021 fue de 3.5 millones de toneladas, con un crecimiento esperado del 70% para 2030 (IRENA, 2020)

4.7.6 Demanda ecuatoriana de biohidrógeno

Ecuador, aunque con una demanda incipiente, ha iniciado estudios para aprovechar su potencial en energías renovables y biomasa para la producción de hidrógeno verde. La demanda actual es de 0.1 millones de toneladas, con proyecciones de triplicarse para 2030 (Ministerio de Energía y Minas, 2023).

Tabla 4. Demanda y Proyección del Hidrógeno verde (2021 - 2030) por regiones.

Región	Demanda (Millones de Toneladas, 2021)	Proyección (2030)
Europa	12.5	18.0
Asia	55.0	70.0
Sudamérica	3.5	6.0
Ecuador	0.1	0.3

Fuente: IEA (2022); Zhang et al., (2021); Ministerio de Energía y Minas (2023).

CAPÍTULO V

5. BIOETANOL

El bioetanol se ha consolidado como una alternativa clave en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles, desempeñando un papel fundamental en la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Su importancia radica en su capacidad para ser utilizado como un biocombustible renovable, contribuyendo a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la diversificación de la matriz energética (Sinche et al., 2022).

La fermentación alcohólica es el proceso bioquímico mediante el cual los azúcares presentes en la biomasa se convierten en bioetanol. Este proceso es catalizado por microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae*, que transforman las hexosas, como la glucosa, y las pentosas, como la xilosa, en etanol y dióxido de carbono (López et al., 2020). La fermentación de hexosas sigue la reacción química estándar:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 \qquad \boldsymbol{Ec.16}$$

La fermentación de pentosas se presenta en la Ec. 17:

$$10C_5H_{10}O_5 \rightarrow 5C_2H_5OH + 5CO_2 \qquad \boldsymbol{Ec.17}$$

La producción de bioetanol se basa en la fermentación de biomasa rica en carbohidratos, que puede provenir de diversas fuentes naturales y residuos agrícolas. Entre las materias primas más utilizadas se encuentran la caña de azúcar, el maíz, la remolacha azucarera y otros cultivos ricos en almidón o azúcares fermentables. Además, se pueden

emplear desechos agrícolas y materiales de lignocelulosa, como los residuos de madera, el bagazo de caña, los rastrojos de trigo y maíz, e incluso residuos industriales que contienen celulosa y hemicelulosa.

El proceso de producción comienza con la hidrólisis de los carbohidratos, en la que los polisacáridos presentes en la biomasa se descomponen en azúcares simples mediante el uso de enzimas o tratamientos químicos. Posteriormente, estos azúcares son fermentados por microorganismos, principalmente levaduras como *Saccharomyces cerevisiae*, que convierten los azúcares en etanol y dióxido de carbono. Una vez completada la fermentación, el etanol obtenido se somete a procesos de destilación y purificación para alcanzar el nivel de pureza adecuado para su uso como biocombustible (López et al., 2020).

El bioetanol puede ser utilizado como un aditivo en combustibles tradicionales, mezclado con gasolina en distintas proporciones (como el E10, con un 10% de etanol, o el E85, con un 85% de etanol), lo que ayuda a mejorar la combustión y reducir las emisiones contaminantes. Además, su uso en motores diseñados específicamente para biocombustibles permite una combustión más limpia y eficiente en comparación con los combustibles fósiles convencionales (Sinche et al., 2022).

A pesar de sus beneficios, la producción de bioetanol enfrenta ciertos desafíos, como la competencia con los cultivos destinados a la alimentación, el consumo de agua en su producción y los costos asociados a su refinamiento. Sin embargo, con el desarrollo de nuevas tecnologías, como la fermentación de biomasa lignocelulósica y el uso

de microorganismos modificados genéticamente, se están logrando avances significativos en la eficiencia de su producción, reduciendo costos y mejorando su viabilidad a gran escala (Sinche et al., 2022).

5.1 Generaciones del bioetanol

Según su origen, el bioetanol se divide en cuatro generaciones.

5.1.1 Primera generación

El bioetanol de primera generación se obtiene a partir de cultivos agrícolas que también pueden ser destinados a la alimentación humana o animal. Entre las materias primas más utilizadas se encuentran el maíz, la caña de azúcar, el trigo y otros cereales ricos en almidón o sacarosa. Estos cultivos son fermentados para producir etanol mediante procesos biotecnológicos, como la hidrólisis enzimática y la fermentación con levaduras. A pesar de ser una fuente renovable de energía, el uso de estos cultivos genera un debate sobre la competencia con la producción de alimentos y el impacto ambiental de la expansión agrícola (Espinoza, 2021).

5.1.2 Segunda generación

El bioetanol de segunda generación se produce a partir de residuos agrícolas, forestales o industriales que contienen celulosa y hemicelulosa. Entre las materias primas más utilizadas se encuentran los desechos de madera, los residuos de cultivos como el bagazo de caña de azúcar, los rastrojos de maíz y trigo, así como ciertos residuos industriales derivados de la biomasa. Este tipo de bioetanol tiene la ventaja de reducir la competencia con los cultivos alimentarios y

aprovechar materiales que, de otro modo, serían considerados desperdicios. Sin embargo, su producción es más compleja, ya que requiere procesos avanzados como el pretratamiento de la biomasa, la hidrólisis enzimática y la fermentación especializada para convertir los azúcares estructurales en etanol (Espinoza, 2021).

5.1.3 Tercera generación

Los biocombustibles de tercera generación se obtienen principalmente a partir de microalgas. Estas son organismos fotosintéticos capaces de generar una alta cantidad de biomasa en comparación con otras fuentes vegetales utilizadas en generaciones previas. El artículo menciona que la producción de biomasa de microalgas varía entre 15 y 25 mg/ha por año (Lam & Lee, 2012), y que, considerando un contenido de lípidos del 30%, se podría obtener entre 4,5 y 7,5 mg/ha de lípidos al año (Tsukahara & Sawayama, 2005). Esta cantidad supera la producción de aceites de fuentes tradicionales como la soja, colza, palma aceitera y *Jatropha curcas*

En términos de conversión a bioetanol, las algas contienen polisacáridos en sus paredes celulares, los cuales pueden ser hidrolizados en azúcares fermentables y posteriormente convertidos en etanol mediante fermentación. Un estudio citado en el artículo señala que el bioetanol producido a partir de biomasa no alimentaria, como las microalgas, podría ser un combustible renovable viable para el sector automotriz (Tan & Lee, 2016; Espinoza, 2021).

5.1.4 Cuarta generación

Los biocombustibles de cuarta generación se basan en la ingeniería genética y biotecnología avanzada para modificar microorganismos y plantas, optimizando su capacidad de capturar carbono y producir biocombustibles de manera más eficiente. En este caso, el bioetanol de cuarta generación se desarrolla a partir de la modificación de microorganismos y cianobacterias, que pueden ser programados para fermentar azúcares de manera más eficiente o incluso para producir directamente compuestos bioenergéticos (Espinoza, 2021).

Se menciona que este enfoque busca lograr una alta relación hidrógeno-carbono, lo que mejora la eficiencia energética de los biocombustibles obtenidos. Además, el desarrollo de microorganismos genéticamente modificados permite la captura de CO_2 atmosférico y su conversión en biomasa o biocombustibles sin necesidad de grandes extensiones de cultivo terrestre (Espinoza, 2021).

Un punto clave en la producción de bioetanol de cuarta generación es la posibilidad de utilizar sistemas biotecnológicos avanzados, como la modificación genética de cianobacterias, para que produzcan compuestos energéticos de manera más eficiente y con menor impacto ambiental. Estas modificaciones permitirían, por ejemplo, la producción directa de bioetanol sin la necesidad de procesos intermedios de fermentación (Espinoza, 2021).

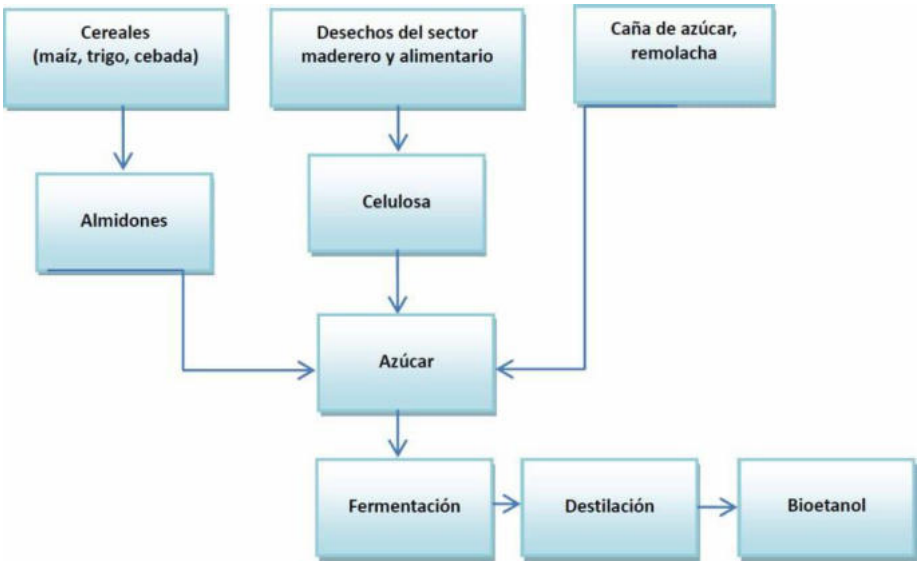


Figura 28. Diagrama del proceso para la obtención de bioetanol.

Fuente: Cosmos (2014).

Países como Brasil y Estados Unidos han dirigido la producción global de bioetanol, contribuyendo a una mezcla de gasolina para reducir la adicción al petróleo y las emisiones de gases de efecto invernadero (Ribeiro et al., 2025).

En Ecuador, el programa Ecopaís, aprecia la vitalidad del bioetanol como suplemento de combustible. Este programa introdujo la mezcla E5 (5% de bioetanol y 95% de gasolina), mostrando una disminución en las emisiones de monóxido de carbono y mejorando la eficiencia del motor (Sinche Arias, 2022).

5.2 Materias primas y métodos de producción

El bioetanol puede producirse a partir de tres tipos principales de biomasa:

5.2.1 Cultivos ricos en azúcares

Caña de azúcar, remolacha y sorgo dulce.

5.2.2 Cultivos ricos en almidón

Maíz, yuca, trigo y papa.

5.2.3 Biomasa lignocelulósica

Residuos agrícolas, forestales y cáscara de *Jatropha curcas* (Sinche et al., 2022).

Tabla 5. Diferentes materias primas para la obtención de bioetanol y su producción potencial.

Materia prima	Producción potencial de bioetanol (Lt)
Caña de azúcar	70
Remolacha azucarera	110
Boniato	125
Papa	110
Mandioca	180
Maíz	360
Arroz	430
Cebada	250
Trigo	340
Sorgo dulce	**60**

Fuente: Guigou (2011).

5.2.4 Proceso de producción

El proceso de producción de bioetanol involucra varias etapas clave:

5.2.4.1. Pretratamiento

En biomasa lignocelulósica, se rompen las estructuras de celulosa y hemicelulosa mediante procesos físicos, químicos o biológicos para hacerlas accesibles a la hidrólisis (Sinche et al., 2022).

5.2.4.2. Hidrólisis

Conversión de polímeros en azúcares fermentables mediante enzimas celulasas y hemicelulasas (Ribeiro, 2025).

5.2.4.3. Fermentación

Microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae* transforman los azúcares en etanol y CO_2. En la sacarificación y fermentación simultánea (SSF), la hidrólisis y la fermentación ocurren en un mismo reactor, optimizando el proceso (Sinche Arias, 2022).

5.2.4.4. Destilación y purificación

Separación del etanol del agua y otros componentes, alcanzando purezas superiores al 99% (Sinche et al., 2022).

Estudios recientes han explorado la producción de bioetanol a partir de residuos de banano, encontrando que los subproductos generados pueden ser utilizados para producir biogás, optimizando el uso de recursos y mejorando la eficiencia del proceso (Ribeiro, 2025).

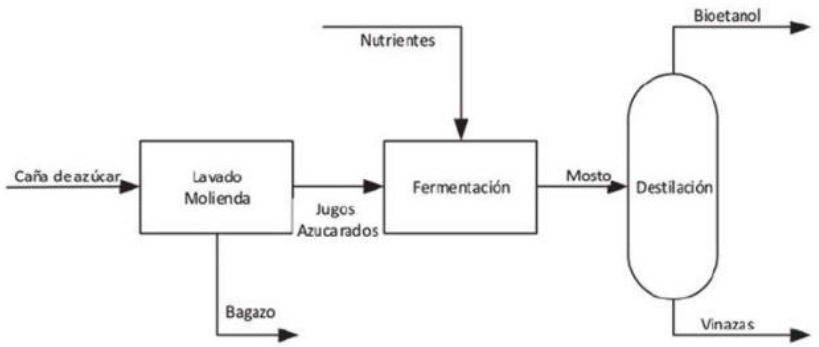


Figura 29. Esquema simplificado de las etapas del proceso de obtención de bioetanol a partir de caña de azúcar.

Fuente: Delgado (2020).

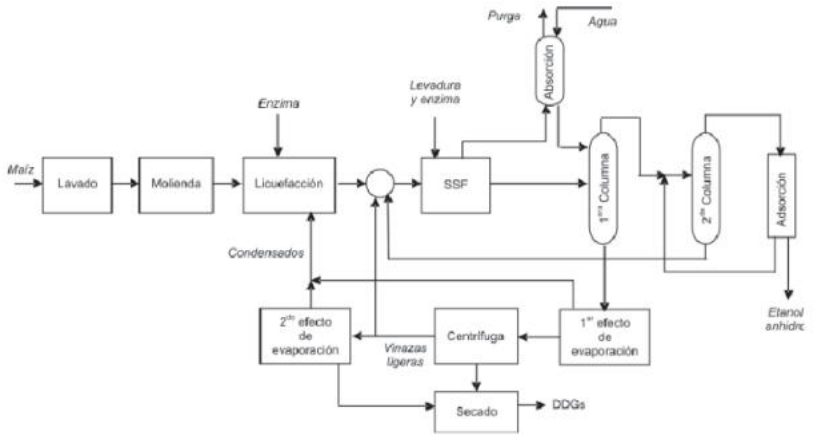


Figura 30. Esquema simplificado de las etapas del proceso de obtención de bioetanol a partir de maíz.

Fuente: Delgado (2020).

5.3 Costos de producción y valorización de biorresiduos en la producción de bioetanol

La producción de bioetanol implica una serie de costos asociados a la materia prima, los procesos de conversión, el consumo energético y la infraestructura. Dependiendo del tipo de biomasa utilizada y la eficiencia del proceso, estos costos pueden variar significativamente. A continuación, se presentan los costos estimados en la producción de bioetanol a partir de distintas fuentes de biomasa, así como la valorización de bioresiduos en este proceso (Sinche et al., 2022).

5.3.1 Costos según el tipo de materia prima

5.3.1.1. Caña de azúcar

La producción de bioetanol a partir de caña de azúcar tiene un costo aproximado de $0.40 a $0.50 por litro. Este proceso es más económico debido al alto contenido de azúcares fermentables y a la facilidad de conversión mediante hidrólisis y fermentación (Sinche et al., 2022).

5.3.1.2. Maíz

En comparación con la caña de azúcar, el bioetanol producido a partir de maíz suele ser más costoso debido a la necesidad de convertir el almidón en azúcares fermentables. Su costo puede estar en un rango similar, pero depende de la eficiencia del proceso y el precio del maíz en el mercado (Sinche et al., 2022).

5.3.1.3. Residuos lignocelulósicos (bioetanol de segunda generación)

La producción a partir de bagazo de caña, rastrojos, residuos de madera y otros materiales lignocelulósicos tiene costos más elevados, estimados entre $0.80 y $1.20 por litro. Esto se debe a la complejidad del pretratamiento necesario para romper la estructura de celulosa y hemicelulosa, lo que requiere procesos físicos, químicos y enzimáticos adicionales (Sinche et al., 2022).

5.3.2 Costos de insumos y procesos

5.3.2.1. Enzimas para hidrólisis

En la producción de bioetanol de segunda generación, la hidrólisis enzimática representa un gasto importante. Se estima que las enzimas celulasas y hemicelulasas utilizadas en la conversión de biomasa lignocelulósica pueden costar entre $0.10 y $0.20 por litro de bioetanol producido (Sinche et al., 2022).

5.3.2.2. Consumo energético en destilación y purificación

La destilación y deshidratación del bioetanol requieren una cantidad significativa de energía, con un consumo estimado de 10 a 15 MJ por litro de bioetanol. Este consumo energético afecta directamente los costos operativos y la viabilidad económica del proceso (Sinche et al., 2022).

5.3.2.3. Infraestructura y costos de instalación

La construcción de una planta de bioetanol puede requerir una inversión inicial elevada. Se estima que una planta con una capacidad de 10 millones de litros anuales requiere una inversión de $5 a $10 millones en infraestructura y equipos (Sinche et al., 2022).

5.3.3 Valorización de biorresiduos en la producción de bioetanol

La producción de bioetanol a partir de biorresiduos permite aprovechar materiales que, de otro modo, serían considerados desechos. Este enfoque mejora la sostenibilidad del proceso y reduce los costos asociados a la adquisición de materia prima.

5.3.4 Rendimiento de bioetanol según tipo de biomasa

El rendimiento de bioetanol por tonelada de biomasa seca varía según el tipo de residuo utilizado:

5.3.4.1. Bagazo de caña de azúcar

280–350 litros de bioetanol por tonelada seca (Sinche et al., 2022).

5.3.4.2. Residuos forestales

150–300 litros por tonelada seca, dependiendo del contenido de lignina (Sinche et al., 2022).

5.3.4.3. Paja de trigo

Hasta 270 litros por tonelada seca (Sinche et al., 2022).

5.3.5 Subproductos y beneficios adicionales

5.3.5.1. Biogás a partir de vinazas

En algunos procesos, los residuos líquidos generados durante la fermentación y destilación del bioetanol (vinazas) pueden ser utilizados para producir biogás mediante digestión anaerobia. Esto permite reducir el impacto ambiental y generar energía adicional, optimizando el proceso de producción (Sinche et al., 2022).

5.3.5.2. Biofertilizantes

Los residuos sólidos generados pueden ser transformados en biofertilizantes, mejorando la rentabilidad del proceso y reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos (Sinche et al., 2022).

5.3.5.3. Producción de bioplásticos

Algunos compuestos obtenidos a partir del bioetanol pueden ser utilizados en la fabricación de bioplásticos, añadiendo valor al proceso y diversificando su aplicación industrial (Sinche et al., 2022).

5.4 Ventajas, desventajas, eficiencia y producción de bioetanol

El bioetanol es un biocombustible que ha ganado relevancia en el sector energético debido a su potencial como fuente alternativa y sostenible de energía. Sin embargo, su uso y producción presentan tanto beneficios como desafíos que deben ser considerados.

5.4.1 Ventajas

5.4.1.1. Alternativa a los combustibles fósiles

El bioetanol representa una opción viable para reducir la dependencia del petróleo y sus derivados, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética y disminuyendo la vulnerabilidad ante crisis energéticas o fluctuaciones en los precios del crudo (Basso et al., 2013).

5.4.1.2. Fuente renovable y sostenible

A diferencia de los combustibles fósiles, que requieren millones de años para formarse, el bioetanol se obtiene a partir de biomasa renovable, como cultivos agrícolas y residuos orgánicos, lo que garantiza su disponibilidad a largo plazo (Basso et al., 2013).

5.4.1.3. Combustión más eficiente y limpia

Su combustión genera menos emisiones de gases contaminantes en comparación con la gasolina y el diésel. Reduce la emisión de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados y partículas finas, lo que mejora la calidad del aire y disminuye el impacto negativo en la salud pública (Basso et al., 2013).

5.4.1.4. Menor impacto ambiental

En términos de emisiones netas de carbono, el bioetanol es más ecológico que los combustibles tradicionales. Si bien su combustión libera dióxido de carbono (CO_2), este es n a través del proceso de fotosíntesis, lo que ayuda a cerrar el ciclo del carbono y reduce su contribución al calentamiento global (Basso et al., 2013).

5.4.1.5. Seguridad energética para países sin reservas de petróleo

Al poder producirse localmente, el bioetanol disminuye la dependencia de las importaciones de petróleo y ayuda a fortalecer la autonomía energética de los países que no cuentan con yacimientos de hidrocarburos. Esto se traduce en una mayor estabilidad económica y en la generación de empleo en el sector agrícola e industrial (Basso et al., 2013).

5.4.1.6. Preservación de los recursos petroleros

Cuando se produce y utiliza a gran escala, el bioetanol permite reducir el consumo de petróleo, lo que contribuye a la conservación de estos recursos no renovables y prolonga su disponibilidad para usos más estratégicos, como la producción de plásticos, productos químicos y otros derivados petroquímicos (Basso et al., 2013).

5.4.1.7. Producción a partir de desechos orgánicos

Además de utilizar cultivos energéticos, el bioetanol puede obtenerse a partir de residuos agrícolas, forestales e industriales, como restos de madera, bagazo de caña de azúcar y rastrojos de cereales. Este proceso, conocido como bioetanol de segunda generación, aprovecha la biomasa lignocelulósica, compuesta principalmente por celulosa (40–50%), hemicelulosa (25–35%) y lignina (15–25%). El aprovechamiento de estos residuos no solo mejora la sostenibilidad del proceso al reducir la presión sobre los cultivos alimentarios, sino que también contribuye a la disminución de desechos y su valorización energética. Por ejemplo, el bagazo de caña de azúcar, que contiene aproximadamente 50% de celulosa y 25% de hemicelulosa, puede generar hasta 280 litros de bioetanol por tonelada de materia seca (Basso et al., 2013).

5.4.2 Desventajas

5.4.2.1. Alta inversión inicial en infraestructura y producción

La instalación de plantas de producción de bioetanol requiere inversiones significativas en tecnología, infraestructura y logística. Esto puede representar una barrera para su implementación en ciertos países o regiones con recursos económicos limitados (Cosmos, 2014).

5.4.2.2. Uso intensivo de tierras agrícolas

Para producir bioetanol a gran escala se necesitan extensas áreas de cultivo, lo que puede entrar en conflicto con la producción de alimentos y generar problemas como la deforestación, la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad. En algunos casos, la expansión de cultivos energéticos ha sido criticada por su impacto ambiental y social (Cosmos, 2014).

5.4.2.3. Regulaciones en el uso de materias primas

En ciertos países, el uso de maíz y otros productos agrícolas para la producción de etanol está restringido debido a preocupaciones sobre la seguridad alimentaria. Esto se debe a que el desvío de cultivos hacia la producción de biocombustibles puede afectar la oferta de alimentos esenciales y generar aumentos en los precios (Cosmos, 2014).

5.4.2.4. Variabilidad en los costos de producción

El costo del bioetanol está sujeto a la fluctuación de los precios de las materias primas agrícolas, como el maíz, el trigo y la caña de azúcar.

Esto puede influir en la competitividad del biocombustible frente a los combustibles fósiles y afectar su viabilidad económica en determinados mercados (Cosmos, 2014).

5.4.2.5. Adaptaciones en los motores

Si bien el bioetanol puede mezclarse con gasolina en bajas proporciones sin afectar el rendimiento de los motores convencionales, en concentraciones elevadas (como el E85) algunos vehículos requieren modificaciones en el sistema de inyección, combustión y almacenamiento de combustible, lo que puede representar un costo adicional para los usuarios (Cosmos, 2014).

5.4.2.6. Alto consumo de agua en su producción

La producción de bioetanol implica un elevado consumo de agua en diversas etapas del proceso, desde el riego de los cultivos hasta la fermentación y destilación del biocombustible. En regiones con escasez hídrica, este factor podría generar conflictos en el uso del recurso y afectar el equilibrio ecológico (Cosmos, 2014).

5.4.2.7. Posible aumento de costos en el futuro

Se estima que, debido al crecimiento de la demanda y las fluctuaciones en los costos de producción, el precio del bioetanol podría aumentar en los próximos años, lo que impactaría su competitividad frente a otras fuentes de energía renovable. Este factor dependerá de los avances tecnológicos en la producción de bioetanol de segunda y tercera generación, así como de las políticas gubernamentales que regulen su uso e incentivación (Cosmos, 2014).

5.4.3 Proceso de conversión

El proceso de producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos involucra varias etapas clave:

5.4.3.1. Pretratamiento

Se utilizan métodos físicos, químicos o biológicos para romper la estructura de la lignina y hacer accesibles los carbohidratos. Se pueden aplicar ácidos (H_2SO_4 diluido) o bases (NaOH) para disolver la hemicelulosa y reducir la cristalinidad de la celulosa.

5.4.3.2. Hidrólisis enzimática

Las enzimas celulasas y hemicelulasas degradan la celulosa y la hemicelulosa en azúcares fermentables, principalmente glucosa ($C_6H_{12}O_6$) y xilosa ($C_5H_{10}O_5$):

$$(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O + celulasas \rightarrow nC_6H_{12}O_6 \qquad \textbf{Ec. 18}$$

5.4.3.3. Fermentación alcohólica

Las levaduras (como *Saccharomyces cerevisiae*) convierten la glucosa en etanol y CO_2:

$$C_6H_{12}O_6 + levaduras \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 \qquad \textbf{Ec. 19}$$

En el caso de la xilosa, se requieren levaduras modificadas genéticamente (*Pichia stipitis* o *Zymomonas mobilis*) para su conversión eficiente.

5.4.3.4. Destilación y purificación

El etanol fermentado (aprox. 10–12% v/v) se concentra por destilación y deshidratación para alcanzar una pureza del >99.5%, adecuada para su uso como biocombustible (IEA, 2021).

5.4.4 Eficiencia y producción

5.4.4.1. Residuo agrícola

Se pueden obtener entre 250 y 400 litros de etanol por tonelada de biomasa seca.

5.4.4.2. Bagazo de caña de azúcar

Producción potencial de 280–350 litros de etanol por tonelada seca.

5.4.4.3. Residuos forestales

Rinde entre 150 y 300 litros por tonelada seca, dependiendo del contenido de lignina.

5.4.4.4. Paja de trigo

Puede generar hasta 270 litros de bioetanol por tonelada.

En términos de impacto ambiental, la producción de bioetanol de segunda generación puede reducir las emisiones de CO_2 entre un 80 y 90% en comparación con los combustibles fósiles (IEA, 2021).

Este enfoque no solo maximiza el aprovechamiento de los recursos, sino que también permite una transición más sostenible hacia una bioeconomía circular.

5.5 Aplicaciones del bioetanol

El bioetanol es un biocombustible versátil con una amplia gama de usos en diferentes sectores, gracias a sus propiedades como fuente de energía renovable y su capacidad para reducir la huella de carbono. Su aplicación no se limita únicamente a la industria del transporte, sino que también desempeña un papel importante en otras áreas, como la generación de energía, la industria química y la producción de bioplásticos. A continuación, se detallan sus principales aplicaciones:

5.5.1 Combustible para el transporte

Una de las principales aplicaciones del bioetanol es su uso como combustible para vehículos automotores. Puede emplearse en combinación con la gasolina en diversas proporciones, dando lugar a mezclas como E10 (10% bioetanol y 90% gasolina) o E85 (85% bioetanol y 15% gasolina). Estos combustibles ayudan a reducir las emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia energética de los motores de combustión interna (Sinche et al., 2022).

Además, en algunos países se han desarrollado vehículos Flex-Fuel, diseñados para funcionar con mezclas de bioetanol en altas concentraciones o incluso con bioetanol puro. Este tipo de automóviles son especialmente populares en países como Brasil, donde el uso de biocombustibles se ha incentivado a nivel gubernamental para reducir

la dependencia del petróleo y promover el uso de energías renovables (Sinche et al., 2022).

El empleo del bioetanol en el sector del transporte no solo contribuye a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también favorece el desarrollo de una economía basada en recursos renovables y en la producción local de biocombustibles (Sinche et al., 2022).

5.5.2 Generación de energía eléctrica y térmica

El bioetanol también puede utilizarse como una fuente de energía en plantas de generación eléctrica y térmica, donde es quemado en calderas o turbinas para producir electricidad o calor. En este contexto, se convierte en una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, especialmente en regiones donde se busca diversificar la matriz energética con fuentes renovables (Ribeiro, 2025).

Además, en algunos sistemas de cogeneración, el bioetanol se emplea para obtener simultáneamente electricidad y calor, lo que maximiza la eficiencia del proceso y reduce el desperdicio energético. Este enfoque es particularmente útil en industrias que requieren grandes cantidades de calor, como las fábricas de papel, alimentos y productos químicos (Ribeiro, 2025).

Otra aplicación emergente es el uso de celdas de combustible de bioetanol, donde este biocombustible es procesado para generar hidrógeno, el cual alimenta celdas electroquímicas para producir electricidad de manera eficiente y con bajas emisiones contaminantes.

Este tipo de tecnología tiene un gran potencial para la generación de energía limpia en el futuro (Ribeiro, 2025).

5.5.3 Materia prima en la industria química

El bioetanol es un compuesto orgánico ampliamente utilizado en la industria química, donde se emplea como materia prima para la producción de distintos productos y compuestos. Una de sus aplicaciones más importantes es la síntesis de etanol de grado industrial, que se usa como solvente en la fabricación de pinturas, barnices, tintas, adhesivos y productos farmacéuticos (Ribeiro, 2025).

Además, el bioetanol puede ser convertido en otros compuestos químicos de alto valor agregado, como el etileno, un insumo clave en la producción de plásticos y polímeros sintéticos. Este proceso, conocido como deshidratación catalítica, permite obtener etileno a partir del etanol, ofreciendo una alternativa sostenible a la producción tradicional basada en derivados del petróleo (Ribeiro, 2025).

En la industria farmacéutica, el bioetanol también es utilizado en la formulación de antisépticos, desinfectantes y productos cosméticos, donde actúa como agente antimicrobiano y solvente para diferentes ingredientes activos (Ribeiro, 2025).

5.5.4 Producción de bioplásticos y biopolímeros

En los últimos años, el bioetanol ha adquirido una gran relevancia en el desarrollo de bioplásticos y biopolímeros, materiales biodegradables y sostenibles que buscan reducir la contaminación por plásticos convencionales. A partir del bioetanol, se puede obtener polietileno

verde, un tipo de plástico producido a partir de fuentes renovables en lugar de derivados del petróleo.

5.5.5 Industria aeronáutica y marítima

El sector del transporte aéreo y marítimo también ha explorado el uso del bioetanol como una alternativa sostenible a los combustibles tradicionales. En la aviación, se han realizado estudios sobre el uso de combustibles sostenibles de aviación (SAF, por sus siglas en inglés), en los que el bioetanol puede jugar un papel importante como materia prima para la producción de queroseno renovable.

En la industria naval, algunas embarcaciones han comenzado a emplear mezclas de bioetanol y diésel para reducir sus emisiones contaminantes. Esto es particularmente relevante en el caso de barcos que operan en zonas protegidas o con regulaciones ambientales estrictas, donde la reducción de emisiones de azufre y partículas es una prioridad (Geologiaweb, 2021).

5.5.6 Calefacción y cocinas domésticas

Otra aplicación del bioetanol es su uso en sistemas de calefacción y cocción, especialmente en regiones donde se buscan alternativas más sostenibles a los combustibles tradicionales. En este sentido, se han desarrollado chimeneas y estufas de bioetanol, que permiten generar calor sin necesidad de conexiones a gas o electricidad, siendo una opción eficiente y libre de emisiones de humo.

En algunas comunidades rurales, el bioetanol se ha promovido como una alternativa a la leña y el carbón en la cocción de alimentos,

contribuyendo a reducir la contaminación del aire en interiores y mejorando la calidad de vida de las personas. Además, su combustión es más limpia y no genera hollín ni residuos sólidos, lo que facilita su uso en entornos domésticos (Geologiaweb, 2021).

5.6 Reacciones para la obtención de bioplásticos a partir de bioetanol

El bioetanol puede transformarse en ácido acético mediante un proceso de oxidación, en el cual el etanol actúa como sustrato y, en presencia de oxígeno, se convierte inicialmente en acetaldehído y posteriormente en ácido acético. Este proceso puede ocurrir de forma biológica mediante bacterias acéticas, como las del género *Acetobacter*, que utilizan enzimas específicas para catalizar estas reacciones. De manera global, el etanol reacciona con el oxígeno para formar ácido acético y agua, constituyendo una ruta de aprovechamiento del bioetanol para la obtención de compuestos de mayor valor agregado.

Acetilación del almidón (reacción de modificación química):

$$Almidón + CH_3COOH \rightarrow Almidón\ acetilado + H_2O \qquad \boldsymbol{Ec.20}$$

Esta reacción ocurre cuando los grupos hidroxilo (-OH) del almidón son sustituidos por grupos acetilo (-$COCH_3$) usando ácido acético (CH_3COOH) o anhídrido acético, mejorando las propiedades mecánicas y térmicas del bioplástico.

Polimerización del almidón modificado

$$Almidón\ modificado + Plastificantes + Agentes\ de\ reticulación \rightarrow Bioplásticos \quad \boldsymbol{Ec.21}$$

En este proceso, el almidón modificado reacciona con plastificantes como el glicerol y agentes reticulantes para formar una estructura polimérica con mejores propiedades de resistencia y flexibilidad (Holguín, 2019).



Figura 31. Bioplásticos.

Fuente: Garrapet Embalagens Ltda (2019).

El polietileno verde tiene las mismas propiedades mecánicas y químicas que el polietileno convencional, pero con la ventaja de tener una menor huella de carbono, ya que su producción captura CO_2 durante el crecimiento de la biomasa utilizada como materia prima. Este material se utiliza en la fabricación de envases, botellas, bolsas y otros productos plásticos con un impacto ambiental reducido.



Figura 32. Polietileno verde.

Fuente: Poliland (2019).

Además, se están desarrollando tecnologías para producir otros biopolímeros, como el ácido poliláctico (PLA) y los polihidroxialcanoatos (PHA), utilizando bioetanol como precursor. Estos materiales tienen aplicaciones en la fabricación de envases biodegradables, textiles ecológicos y dispositivos médicos de un solo uso (Geologiaweb, 2021).



Figura 33. Ácido Poliláctico (PLA).

Fuente: PolimerBio (2019).

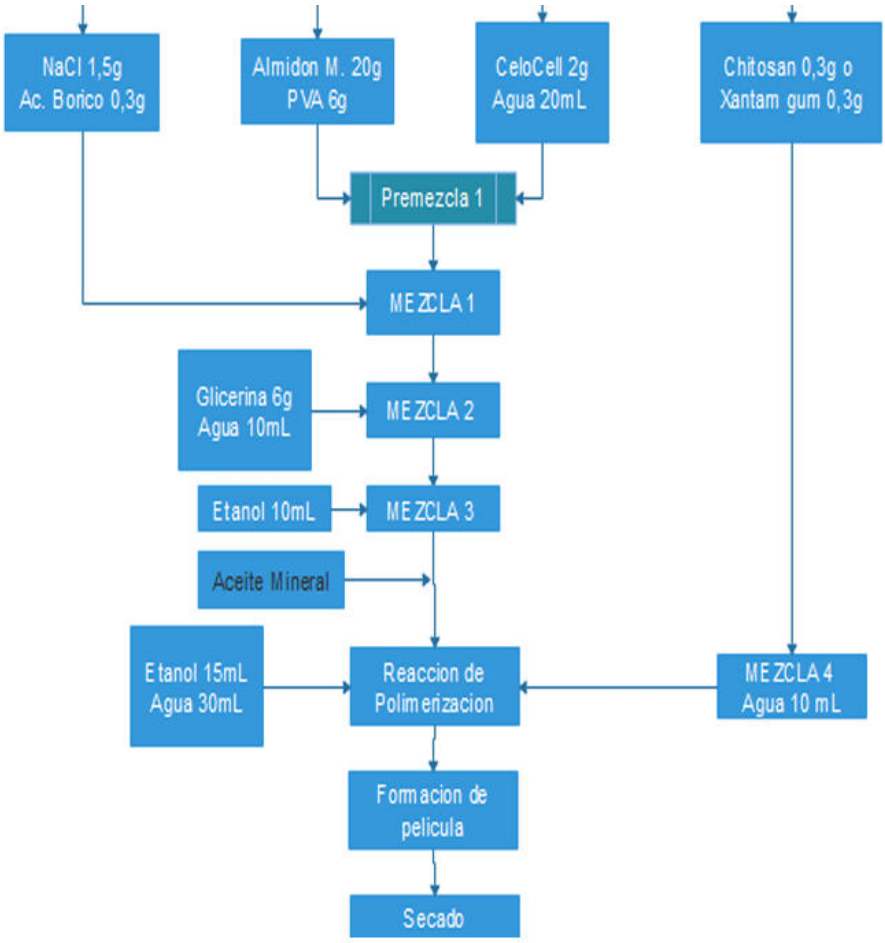


Figura 34. Diagrama de proceso para la obtención de un bioplástico.

Fuente: Holguín (2019).

5.7 Desafíos en la producción de bioetanol

Aunque el bioetanol es una alternativa prometedora y sostenible a los combustibles fósiles, su producción enfrenta varios desafíos significativos. Estos obstáculos no solo afectan la viabilidad económica de la producción de bioetanol, sino que también tienen implicaciones en el medio ambiente y en la seguridad alimentaria global. A

continuación, se exploran algunos de los principales retos asociados con la producción de bioetanol:

5.7.1 Competencia con cultivos alimentarios

Uno de los desafíos más importantes en la producción de bioetanol es la competencia con los cultivos alimentarios, especialmente en el caso de cultivos como el maíz, que es uno de los principales insumos para la producción de este biocombustible. El uso de tierras agrícolas para cultivar maíz con fines energéticos puede generar una tensión directa entre la producción de alimentos y la producción de biocombustibles, lo que podría afectar la seguridad alimentaria de las poblaciones vulnerables. Este fenómeno es especialmente crítico en países en desarrollo, donde el acceso a alimentos básicos ya es un desafío debido a factores como el cambio climático, las políticas comerciales y la escasez de tierras cultivables.

El cultivo masivo de maíz para producir bioetanol puede provocar un aumento de los precios de los alimentos, ya que se destina una mayor proporción de la producción agrícola a la fabricación de biocombustibles, lo que disminuye la oferta disponible para el consumo humano. Este fenómeno también puede generar desajustes económicos en las regiones donde los cultivos alimentarios dependen de estos recursos. En respuesta a este desafío, se están investigando fuentes alternativas de biomasa, como residuos agrícolas, algas y plantas no comestibles, que no compiten directamente con los alimentos y que podrían minimizar este tipo de conflicto.

5.7.2 Eficiencia energética y costos

Otro desafío crítico en la producción de bioetanol es la eficiencia energética y los costos asociados con la conversión de biomasa en etanol. A pesar de los avances tecnológicos, la producción de bioetanol sigue siendo un proceso que requiere una inversión inicial elevada, con costos de instalación que pueden oscilar entre $5 y $10 millones por cada 10 millones de litros de capacidad anual (IEA, 2021). Además, los costos operativos pueden representar hasta 60% del costo total de producción, debido al uso de energía, enzimas y procesos de purificación.

Cuando se emplean materiales lignocelulósicos (residuos vegetales como paja, tallos y hojas), la conversión en etanol es considerablemente más compleja y costosa que la fermentación de azúcares simples como los del maíz o la caña de azúcar. Mientras que la producción de etanol a partir de caña de azúcar cuesta alrededor de $0.40 a $0.50 por litro, el bioetanol de segunda generación (a partir de residuos lignocelulósicos) puede costar entre $0.80 y $1.20 por litro, principalmente debido a los costos adicionales de pretratamiento y conversión (Basso et al., 2013).

El proceso de pretratamiento es una de las etapas más costosas, representando entre 20 y 30% del costo total de producción. En la hidrólisis, se requieren enzimas especializadas como celulasas y hemicelulasas, cuyo costo puede alcanzar de $0.10 a $0.20 por litro de etanol producido. Además, el consumo energético en la destilación y purificación puede ser de 10 a 15 MJ por litro de etanol, lo que impacta directamente en la sostenibilidad del proceso (IEA, 2021).

Sin embargo, las investigaciones están avanzando para mejorar la eficiencia de estos procesos, mediante el desarrollo de enzimas más efectivas, técnicas de pretratamiento más económicas y el uso de cepas microbianas genéticamente modificadas. Estas innovaciones han permitido reducir los costos en más del 30% en la última década y se espera que en los próximos años el bioetanol de segunda generación pueda competir directamente con los combustibles fósiles (IEA, 2021).

La mejora en la eficiencia energética y la reducción de costos son áreas clave para hacer que la producción de bioetanol sea económicamente viable a gran escala, con la meta de alcanzar un costo de $0.50 por litro en los próximos años, acercándose a la competitividad con la gasolina, cuyo precio ronda los $0.60 a $0.80 por litro en muchos mercados internacionales (IEA, 2021).

5.7.3 Impacto ambiental

Aunque el bioetanol tiene el potencial de reducir las emisiones de CO_2 en comparación con los combustibles fósiles, su producción no está exenta de impactos ambientales negativos, especialmente si no se gestiona adecuadamente. Uno de los principales problemas es el uso intensivo de agua, ya que el proceso de fermentación y las etapas posteriores de purificación requieren grandes cantidades de este recurso. En algunas regiones del mundo, donde los recursos hídricos ya son limitados, este consumo excesivo de agua podría exacerbar la escasez y afectar a las comunidades locales y los ecosistemas circundantes (Sinche et al., 2022).

5.8 Perspectivas futuras y desarrollo tecnológico

Los avances tecnológicos están desempeñando un papel crucial en la mejora de la eficiencia de producción de bioetanol, impulsando tanto su viabilidad económica como su impacto ambiental. En las últimas décadas, la investigación y el desarrollo en biotecnología y procesos industriales han permitido optimizar diversos aspectos de la producción de bioetanol, lo que lo convierte en una opción aún más competitiva frente a los combustibles fósiles. A continuación, se detallan algunos de los avances tecnológicos más destacados que perfilan el futuro de este biocombustible:

5.8.1 Optimización de microorganismos

Uno de los principales avances tecnológicos en la producción de bioetanol ha sido la mejora de los microorganismos utilizados en el proceso de fermentación. Tradicionalmente, el proceso de producción de bioetanol se realizaba mediante cepas de *Saccharomyces cerevisiae*, una levadura ampliamente utilizada debido a su eficiencia en la conversión de glucosa en etanol a través de la fermentación alcohólica. Sin embargo, *S. cerevisiae* tiene limitaciones en la fermentación de pentosas, como la xilosa y la arabinosa, lo que reduce su eficacia cuando se emplean materias primas lignocelulósicas, como residuos agrícolas y forestales (Sinche et al., 2022).

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado cepas genéticamente modificadas y microorganismos recombinantes con una mayor capacidad de fermentación de una amplia gama de azúcares. Por ejemplo, mediante la introducción de genes de *Pichia stipitis* o

Zymomonas mobilis, se ha logrado que *S. cerevisiae* pueda metabolizar eficientemente pentosas, aumentando así el rendimiento del bioetanol en hasta un 30-50% en comparación con cepas convencionales (Sinche et al., 2022).

Además, la optimización de microorganismos ha permitido el desarrollo de cepas termotolerantes, capaces de operar a temperaturas superiores a 40-45°C, lo que no solo mejora la cinética de fermentación, sino que también reduce el riesgo de contaminación por microorganismos competidores. De manera similar, se han diseñado cepas con tolerancia al estrés osmótico y etanólico, que pueden resistir concentraciones de etanol superiores al 15% v/v, lo que incrementa la eficiencia del proceso y reduce la necesidad de destilación intermedia (Sinche et al., 2022).

Otro avance importante es el uso de bacterias productoras de bioetanol, como *Clostridium thermocellum* y *Escherichia coli* modificadas, que pueden fermentar tanto hexosas como pentosas sin necesidad de pretratamientos químicos complejos. Estas bacterias también presentan la ventaja de poseer sistemas enzimáticos capaces de degradar directamente la biomasa lignocelulósica, eliminando la necesidad de enzimas comerciales como celulasas y hemicelulasas, lo que puede reducir los costos en más del 20% (Sinche et al., 2022).

La optimización de microorganismos no solo mejora la eficiencia de la fermentación, sino que también puede reducir la necesidad de insumos químicos, como nutrientes y enzimas, lo que hace que la producción de bioetanol sea más sostenible y económica. Esta tecnología se perfila

como uno de los pilares del desarrollo futuro del bioetanol, ya que permite incrementar la cantidad de bioetanol producido sin aumentar el uso de recursos naturales ni la generación de desechos (Sinche et al., 2022).

5.8.2 Procesos híbridos

Otro enfoque innovador que está ganando terreno en la producción de bioetanol es la combinación de tecnologías para crear procesos híbridos que integran el bioetanol con otros bioproductos. Un ejemplo de ello es la combinación de bioetanol con biogás y biofertilizantes, lo que optimiza el uso de los residuos generados durante la producción del biocombustible. Este proceso no solo mejora la sostenibilidad del proceso de producción, sino que también agrega valor a los subproductos derivados de la biomasa (Ribeiro, 2025).

Por ejemplo, el biogás, un subproducto de la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos, puede ser utilizado para generar energía, reduciendo la dependencia de fuentes externas de electricidad durante la producción de bioetanol. Asimismo, los biofertilizantes producidos a partir de estos residuos pueden ser utilizados para fertilizar los cultivos destinados a la producción de bioetanol, cerrando así el ciclo de nutrientes. La implementación de estos procesos híbridos no solo mejora la eficiencia energética y reduce los costos de producción, sino que también contribuye a la economía circular, donde los residuos se reutilizan y transforman en productos útiles. Este enfoque representa una tendencia creciente hacia una producción más integrada y sostenible de biocombustibles.

5.8.3 Expansión de mercados y estrategias de seguridad energética

A medida que los precios del petróleo y las preocupaciones sobre el cambio climático continúan siendo factores clave en la política energética global, muchos países en desarrollo están explorando la producción de bioetanol como una estrategia clave para mejorar su seguridad energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados. De acuerdo con Sinche Arias (2022), estas naciones están viendo en el bioetanol una oportunidad estratégica para diversificar sus fuentes de energía, reducir sus costos de importación de petróleo y fomentar el desarrollo de su industria agrícola.

Además, la producción de bioetanol puede servir como una fuente de ingresos y un motor de crecimiento económico para estos países. Al desarrollar sus propias infraestructuras de producción de biocombustibles, los países en desarrollo pueden aprovechar sus recursos naturales locales (como los residuos agrícolas y la biomasa) para generar energía de manera más autónoma y a menor costo. Esto también contribuye a la creación de empleo en las áreas rurales, mejorando la economía local. La expansión de mercados para el bioetanol, tanto en el sector energético como en la industria química, promete abrir nuevas oportunidades de negocio y fomentar una transición más rápida hacia un modelo de energía limpia y sostenible a nivel global (Sinche et al., 2022).

5.9 Biocombustibles y productos derivados del Bioetanol

El bioetanol es un componente clave en la producción de biocombustibles, que se presentan en distintas mezclas según su

proporción con la gasolina o el diésel. A continuación, se describen algunas de las combinaciones más comunes y sus características:

5.9.1 E5

Es una mezcla de combustible compuesta por un 5% de bioetanol y un 95% de gasolina. Aunque sigue utilizándose en Europa, en muchos países se ha promovido el uso del E10 como estándar. Su baja proporción de bioetanol permite su compatibilidad con la mayoría de los motores de gasolina convencionales sin necesidad de modificaciones. Sin embargo, se prevé que la normativa europea aumente este límite al 10% (E10), ya que estudios indican que los vehículos actuales toleran sin problemas mezclas con hasta un 10% de bioetanol, ofreciendo beneficios ambientales significativos (Comisión de Gasolina-Gasoil QO6, 2008; Webscolar, 2011).

5.9.2 E10

Compuesta por un 10% de bioetanol y un 90% de gasolina, esta mezcla es la más utilizada en Estados Unidos. Una de sus principales ventajas es que no requiere modificaciones en los motores de los vehículos, facilitando su adopción. Además, el bioetanol presente en esta mezcla mejora el octanaje del combustible, lo que se traduce en un mejor rendimiento del motor y una reducción en las emisiones de gases contaminantes (Comisión de Gasolina-Gasoil QO6, 2008; Webscolar, 2011).



Figura 35. Planta de bioetanol en Hugoton, Kansas (EEUU).

Fuente: IDOM (2019).

5.9.3 E85

Esta mezcla contiene un 85% de bioetanol y un 15% de gasolina, y se utiliza principalmente en vehículos con motores diseñados específicamente para esta proporción de bioetanol. En países como Estados Unidos, Brasil y Suecia, existen los llamados "Flexible Fuel Vehicles" (FFV), que son vehículos capaces de funcionar con diferentes mezclas de bioetanol y gasolina, incluidas mezclas de hasta el 85%. El E85 mejora el rendimiento de los vehículos debido al mayor índice de octano del bioetanol y contribuye a una disminución significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles tradicionales (Comisión de Gasolina-Gasoil QO6, 2008; Webscolar, 2011).



Figura 36. Planta productora de Bioetanol en Brasil.

Fuente: Basseches & Sauer (2023).

5.9.4 E95 y E100

Estas mezclas contienen un 95% y un 100% de bioetanol, respectivamente, y se utilizan en Brasil y otros países que han adoptado políticas para promover el uso de biocombustibles. Los motores diseñados para E95 y E100 están optimizados para funcionar con estas concentraciones elevadas de bioetanol, permitiendo una operación más eficiente y con menores emisiones contaminantes. Brasil es uno de los países más avanzados en el uso de bioetanol, y su exitoso programa de biocombustibles ha sido un modelo para otras naciones (Comisión de Gasolina-Gasoil QO6, 2008; Webscolar, 2011).

5.9.5 E-Diésel

El E-Diésel es una combinación de bioetanol y diésel, lograda mediante un aditivo solvente. Esta mezcla ha demostrado ser eficaz para mejorar la combustión en los motores diésel y reducir significativamente las

emisiones contaminantes. El uso de E-Diésel está en expansión en Estados Unidos y Brasil, con planes para aumentar su disponibilidad en Europa en el futuro cercano. Este biocombustible ofrece la ventaja de aprovechar la infraestructura existente de distribución de diésel, incorporando un porcentaje significativo de bioetanol, lo que ayuda a reducir las emisiones de carbono y la dependencia de los combustibles fósiles (Comisión de Gasolina-Gasoil QO6, 2008; Webscolar, 2011).

5.9.6 ETBE (Etil-ter-butil-éter)

A diferencia de las mezclas de bioetanol mencionadas anteriormente, el ETBE no es un biocombustible como tal, sino un aditivo para la gasolina. Se obtiene al sintetizar bioetanol con isobutileno, un subproducto del petróleo. La principal ventaja del ETBE sobre el etanol puro es su menor volatilidad, lo que mejora su almacenamiento y transporte, además de mejorar la miscibilidad con la gasolina. Esto facilita su uso en las mezclas de combustibles sin comprometer la estabilidad del combustible. El ETBE se emplea generalmente en proporciones de entre el 10% y el 15% para aumentar el octanaje de la gasolina sin necesidad de utilizar plomo, contribuyendo a reducir la contaminación y a mejorar el rendimiento de los motores (Comisión de Gasolina-Gasoil QO6, 2008; Webscolar, 2011).

5.10 Ejemplos de producción de bioetanol

5.10.1 Bioetanol a partir de almidón de microalgas

El bioetanol de tercera generación se produce a partir de biomasa de microalgas, una fuente renovable con gran potencial para satisfacer la

creciente demanda de energía limpia y sostenible. A diferencia de los biocombustibles de primera y segunda generación, que dependen de cultivos alimentarios o residuos lignocelulósicos, las microalgas pueden cultivarse en condiciones controladas sin competir por tierras agrícolas. Además, presentan ventajas significativas, como un crecimiento acelerado, alta eficiencia fotosintética y la capacidad de fijar grandes cantidades de dióxido de carbono, lo que contribuye a mitigar el impacto ambiental de su producción (Da Maia et al., 2020).

El proceso de obtención del bioetanol de microalgas comienza con el cultivo de especies ricas en carbohidratos, como *Chlorella, Spirulina* y *Dunaliella*. El crecimiento de estas microalgas depende de factores como la temperatura, el pH, la disponibilidad de luz y nutrientes, así como la agitación del medio. En condiciones de estrés nutricional, como la limitación de nitrógeno, las microalgas aumentan la acumulación de polisacáridos en sus células, lo que favorece su uso en la producción de bioetanol (Da Maia et al., 2020).

Una vez que se alcanza una biomasa suficiente, las microalgas se cosechan y se someten a un proceso de ruptura celular para liberar los polisacáridos almacenados. Dado que las microalgas no contienen lignina, a diferencia de la biomasa lignocelulósica, su hidrólisis resulta más sencilla y eficiente. La degradación de los carbohidratos se lleva a cabo mediante procesos enzimáticos con amilasas y celulasas, que descomponen las macromoléculas en azúcares fermentables, como la glucosa (Da Maia et al., 2020).

La fermentación de estos azúcares se realiza mediante microorganismos, generalmente levaduras del género *Saccharomyces*, que convierten los monosacáridos en bioetanol y dióxido de carbono. Este proceso resulta clave para obtener el biocombustible en su forma cruda, el cual posteriormente se somete a destilación y deshidratación para mejorar su pureza y adecuarlo para su uso como combustible renovable (Da Maia et al., 2020).

El modelo de producción de bioetanol a partir de microalgas puede integrarse dentro de una biorrefinería, donde la biomasa se aprovecha para la obtención de otros productos de alto valor añadido, como bioplásticos, pigmentos naturales y compuestos bioactivos. Esto permite optimizar el uso de los recursos, minimizar los residuos y mejorar la viabilidad económica del proceso (Da Maia et al., 2020).

El bioetanol de tercera generación se presenta como una alternativa prometedora a los combustibles fósiles, con un menor impacto ambiental y mayores beneficios en términos de eficiencia y sostenibilidad. Sin embargo, para su implementación a gran escala, es necesario seguir desarrollando tecnologías que reduzcan los costos de producción y mejoren la conversión de biomasa en bioetanol de manera eficiente (Da Maia et al., 2020).

5.10.2 Producción de bioetanol a partir de biomasa de macroalgas

El bioetanol de cuarta generación busca nuevas fuentes de biomasa no lignocelulósica para mejorar la producción sostenible de biocombustibles. Una de estas fuentes prometedoras es la quitina, el segundo biopolímero más abundante en la Tierra. Sin embargo, su

naturaleza cristalina dificulta su aplicación en la producción de bioetanol. Para superar esta limitación, se emplean quitinasas, enzimas capaces de hidrolizar la quitina en oligómeros más pequeños (Dave et al., 2019).

En un estudio reciente, se aísla la bacteria marina *Bacillus haynesii*, capaz de degradar quitina coloidal y producir oligosacáridos de quitina, los cuales luego pueden ser fermentados por *Mucor circinelloides* para generar bioetanol. En el proceso experimental, *Bacillus haynesii* muestra una actividad máxima de quitinasa de 3.08 U/mL con una actividad específica de 96 U/mg a las 90 horas de cultivo. Los oligosacáridos de quitina obtenidos pueden analizarse mediante espectrometría de masas para confirmar su estructura química. Posteriormente, *Mucor circinelloides* se utiliza como microorganismo fermentador en un medio de cultivo agitado, obteniendo una concentración máxima de 7.4 g/L de bioetanol a partir de 30 g/L de oligosacáridos de quitina (Dave et al., 2019).

La eficiencia de conversión alcanza un rendimiento de 0.25 g de etanol por gramo de sustrato en 55 horas, con un inóculo de 48 horas en un medio de fermentación de 80 mL. El estudio también evalúa el impacto de diferentes parámetros en la producción de bioetanol, incluyendo la edad del inóculo, el volumen de fermentación, los tipos de sustratos utilizados y la concentración del sustrato. Se observa que el volumen de fermentación óptimo es del 80 %, ya que permite una mayor producción total de etanol. En cuanto a la concentración del sustrato, el mejor rendimiento se obtiene con 30 g/L de oligosacáridos de quitina,

mientras que concentraciones mayores reducen la conversión de etanol debido a inhibiciones metabólicas (Dave et al., 2019).

El modelo de biorrefinería basado en la utilización de quitina como sustrato ofrece una alternativa innovadora para la producción de bioetanol de cuarta generación. Este enfoque permite valorizar desechos de origen marino, como los residuos de crustáceos y otros invertebrados, reduciendo el impacto ambiental asociado con la eliminación de estos materiales. Sin embargo, para optimizar la eficiencia del proceso, es necesario mejorar la producción de quitinasa, desarrollar métodos de fermentación más eficientes y explorar estrategias de modificación genética en los microorganismos utilizados (Dave et al., 2019).

5.10.3 Obtención de bioetanol a partir de banano de rechazo

El proceso de producción de bioetanol a partir de banano de rechazo se puede llevar a cabo mediante una fermentación en la que es posible comparar distintos métodos de hidrólisis para liberar los azúcares fermentables. Se pueden evaluar tres tipos de hidrólisis: endógena inducida, exógena con enzimas comerciales y ácida. Se determina que la hidrólisis endógena inducida ofrece los mayores rendimientos y, por tanto, puede ser la metodología seleccionada para las fermentaciones a mayor escala (Guevara et al., 2012).

Para la hidrólisis endógena, los bananos verdes pueden almacenarse en una cámara de maduración con etileno a 50 ppm, a una temperatura de 25°C y una humedad relativa del 85% durante 96 horas. Luego, se puede extraer el jugo de banano añadiendo una solución acuosa de

hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), dejándolo reposar y centrifugándolo. Posteriormente, el jugo puede neutralizarse con ácido sulfúrico (H_2SO_4), pasteurizarse y filtrarse hasta obtener un jugo clarificado listo para la fermentación (Guevara et al., 2012).

Las fermentaciones pueden realizarse en dos escalas: una inicial de 1 litro para comparar los métodos de hidrólisis y otra de 15 litros para evaluar el proceso a mayor volumen. Se puede utilizar la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, activada previamente a 37°C durante 30 minutos. La fermentación se puede llevar a cabo a temperatura ambiente (25°C) durante 48 horas con agitación mecánica o hidráulica, dependiendo del tamaño del fermentador. Luego, el etanol puede cuantificarse por cromatografía de gases y el fermento destilarse a presión atmosférica (Guevara et al., 2012).



Figura 37. Banano de rechazo.

Fuente: El Maizal Audiovisual (2015).

El rendimiento promedio de etanol que se puede obtener es de 0.065 litros por kilogramo de banano verde, con un máximo experimental de 0.12 litros por kilogramo. Este rendimiento es comparable con el que se alcanza en la fermentación de caña de azúcar, que llega a 0.086 litros por kilogramo de caña. Además, las vinazas resultantes de la destilación pueden someterse a digestión anaerobia para la producción de biogás, logrando un rendimiento de 2.24 litros de biogás por litro de vinaza cuando se utiliza rumen como inóculo (Guevara et al., 2012).

Este proceso puede demostrarse como viable desde el punto de vista técnico y económico, ya que la hidrólisis endógena no requiere la compra de enzimas comerciales ni el uso de equipos de alta temperatura. Además, representa una alternativa sostenible para el aprovechamiento del banano de rechazo y la reducción del impacto ambiental en las zonas productoras (Guevara et al., 2012).

5.10.4 Producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos vegetales

La producción de bioetanol se puede realizar a partir de residuos orgánicos vegetales, específicamente cáscaras de mandarina (*Citrus reticulata*), maracuyá (*Passiflora edulis*) y hojas de eucalipto (*Eucalyptus globulus*). Estos residuos pueden ser recolectados en bolsas de polietileno de primer uso, transportados al laboratorio y sometidos a un proceso de limpieza y preparación.

Primero, se lavan con agua potable, se desinfectan con una solución de hipoclorito de sodio al 2.5% durante 30 minutos y se enjuagan con agua destilada. Posteriormente, se secan a 60°C en una estufa de laboratorio

por 2 horas y luego se trituran mecánicamente hasta obtener partículas de un tamaño de 0.5 a 1 mm (Llenque et al., 2020).



Figura 38. Residuos orgánicos vegetales.

Fuente: Autocompostaje León (2017).

Una vez preparado el material vegetal, se puede realizar la hidrólisis ácida para descomponer la celulosa y hemicelulosa en azúcares fermentables. Para ello, un kilogramo de residuo molido se mezcla con 4 litros de ácido clorhídrico (HCl) 1.0M y se calienta a 100°C durante 5 horas. Luego, el hidrolizado se filtra y su pH se ajusta a 4.5 mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH) 1.0M. Los sólidos solubles presentes en el hidrolizado pueden medirse utilizando un refractómetro, obteniendo valores entre 14 y 22° Brix, dependiendo del tipo de residuo vegetal empleado (Llenque et al., 2020).

La fermentación se puede llevar a cabo en un sistema con 2.2 litros de medio de producción suplementado con sulfato de amonio (400 mg/L) para proporcionar nutrientes adicionales a la levadura. Se utiliza la cepa *Saccharomyces cerevisiae* MIT-L51, la cual es previamente activada en

caldo Sabouraud glucosa e incubada durante 12 horas a 30°C. Luego, se centrifuga para obtener una suspensión con una concentración de 1.2 × 10^{12} levaduras/ml. Se inoculan 200 ml de esta levadura en el medio fermentativo, que contiene 100 ml/L de hidrolizado. La fermentación se realiza en condiciones de reposo a temperatura ambiente (23-25°C) durante 7 días. Durante este período, el pH del medio fermentativo se reduce a valores cercanos a 2.0, lo que confirma la actividad metabólica de la levadura en la conversión de azúcares en etanol. Posteriormente, el sobrenadante se separa por decantación y se filtra con papel Whatman N°10 para eliminar residuos sólidos antes de la destilación (Llenque et al., 2020).

La destilación se puede llevar a cabo a 78°C durante 3 horas utilizando un sistema de destilación de vidrio con serpentín interno. El volumen de bioetanol obtenido se mide en una probeta graduada y su grado alcohólico se determina utilizando un alcoholímetro y tablas de equivalencia de alcoholimetría internacional. Los resultados muestran que los rendimientos de bioetanol varían según el tipo de residuo utilizado: 3.8 ± 0.2 % (v/v) para cáscaras de mandarina, 4.2 ± 0.1 % (v/v) para cáscaras de maracuyá y 4.7 ± 0.1 % (v/v) para hojas de eucalipto. Se encuentra que el bioetanol obtenido tiene una pureza del 80% en volumen. Un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95% indica diferencias significativas entre los rendimientos de bioetanol según el tipo de residuo utilizado. De acuerdo con la prueba de Tukey, cada uno de los residuos evaluados presenta rendimientos estadísticamente distintos (Llenque et al., 2020).

Estos resultados demuestran que los residuos vegetales pueden ser utilizados como materia prima para la producción de bioetanol con rendimientos prometedores, especialmente las hojas de eucalipto, que presentan el mayor rendimiento. Además, este proceso representa una alternativa viable y sostenible para la valorización de residuos agroindustriales y urbanos, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y promoviendo el desarrollo de biocombustibles como fuente de energía renovable (Llenque et al., 2020).

CAPÍTULO VI

6. PROCESOS TERMOQUÍMICOS PARA LA UTILIZACIÓN DE BIOMASA

Debido a que en la naturaleza de la biomasa se encuentra la de convertirse en combustibles y energía mediante procesos químicos y biológicos, se puede hacer uso de distintas vías para la obtención de distintas sustancias a partir de biomasa de desecho, el enfoque de esta sección es el procesamiento termoquímico, esta clase de procesamiento son aquellos en los que el calor surge un rol fundamental para generar cambios en la estructura de la biomasa, se puede llegar a trabajar con medios catalizados o sin catalizar, el tipo de proceso y condiciones se eligen de acuerdo al tipo y cantidad de la materia prima. Hacemos énfasis en estos procesos en lugar de procesos bioquímicos debido a que presentan una mayor velocidad de reacción, por ende, una mayor producción y se evita procesos de desinfección de las materias primas. Cabe recalcar que, en la mayoría de los procesos a revisar se puede llegar a obtener fracciones de alquitrán que se recomienda removerlos o convertirlos en otra sustancia (Munar et al., 2022).

En este documento se describen varios de los procesos termoquímicos más comunes, sin embargo, podemos encontrar que, la combustión es el medio más común, seguido de ello la gasificación y la pirólisis (Munar et al., 2022).

6.1 Combustión directa

Es la combustión de la biomasa, se lleva a cabo una oxidación que libera la energía de los enlaces existentes en las moléculas. El proceso requiere de un equipo que capte la liberación de la energía a través de un medio de transporte como lo son los gases de combustión. Los equipos que se usan en esta opción están basados en generadores de carbón (Munar et al., 2022)

6.2 Pirólisis

Se produce mediante un calentamiento en el que se limita o niega la presencia de oxígeno y sirve como base para los distintos procesos térmicos avanzados como lo puede ser la gasificación. (Klug Michael, 2012)

Ejemplos de uso tenemos en la investigación de (Nandhini et al., 2022) que, la copirolisis de desechos de maní y cereales produjo un poder calorífico de 31.44MJ/kg a 540°C,

Los procesos de pirólisis no solo generan un producto, generan distintas fracciones que se puede obtener tanto en fase gaseosa como hidrógeno y metano junto a gases de combustión, en fase líquida aceites variados y en fase sólida tenemos al coque. Se debe tener en cuenta que, el Bio-oil obtenido de este proceso contiene agua que no puede ser separada y por lo tanto, tiene una potencia de 17MJ/kg así como un pH bajo que ataca al acero de forma lenta por lo que se requieren tanques especializados de acero inoxidable o poliolefinas, esto debido a la presencia de ácidos fórmico y acético. (Klug, 2012)

Mediante el incremento de la temperatura, las interacciones intermoleculares aumentan, los choques son más numéricos y energéticos, a tal punto que las moléculas no pueden resistir mantener su estructura y comienzan un proceso de rompimiento y reorganización para transformarse en productos más estables, estas estructuras pueden alcanzar un "equilibrio" basado en la temperatura de trabajo, por ello cada tipo de pirólisis varía principalmente con variantes de la temperatura (Orrego Restrepo, 2021).

Las reacciones principales que podemos encontrar son la deshidrogenación y descomposición térmica, mientras que como reacciones secundarias tenemos a la polimerización e isomerización de volátiles primarios dentro de la biomasa donde el tiempo de residencia es el que las favorece, pero todo este conjunto de sucesos es muy complejo para tratar de marcar como un mecanismo de reacción (Orrego Restrepo, 2021).

Las variables principales que influyen en la eficiencia y tipos de productos son (Hernández, 2011):

- Presión
- Especie de biomasa
- Tipo de reactor
- Temperatura

Los desechos de las comunidades humanas pueden cambiar su composición de acuerdo con el estilo de vida, economía local,

condiciones climáticas e infraestructura, pero principalmente son compuestos por plástico y papel en un 80%. Estos desechos son los principales para su transformación en combustibles más eficientes mediante pirólisis, sin embargo, este proceso tiende a liberar cantidades reducidas de NOx, SOx y gases varios de efecto invernadero (Nandhini et al., 2022).

Si hablamos del uso exclusivo de biomasa podemos entender que, cualquiera de los combustibles obtenidos, al ser utilizados no aumentaría la cantidad de carbono presente en la atmósfera, por lo que sirve como una forma de evitar contaminación (Hernández, 2011).

El combustible de mayor importancia obtenido en este proceso es el bio-oil, teniendo en cuenta que la biomasa cuenta con cantidades muy pequeñas de sulfuros podemos realizar una combustión con poca generación de SOx, así mismo sucede con las emisiones de NOx ya que genera 50% menos que el diésel (Hernández, 2011).

6.2.1 Pirólisis de compuestos lignocelulósicos

Dentro de la biomasa, podemos encontrar que, los principales desechos son los de tipo lignocelulósico, lo que significa que portan con distintas concentraciones de hemicelulosa, celulosa y lignina, por ello muchos de los estudios de pirólisis se centran en las relaciones e interacciones entre estos compuestos durante el procesamiento, sin embargo, muchos denotan que no existe una relación directa de la composición de esta mezcla y los rendimientos, pero otra parte parte de estudiosos niega este hecho marcando relaciones entre la presencia de lignina en rendimiento de carbonización y polimerización de productos macromoleculares, así

como de relaciones entre la celulosa entre la lignina y el xilano (Orrego Restrepo, 2021).

6.2.2 Reactores pirolíticos

Los procesos de pirólisis se pueden y deben llevar a cabo en situaciones controladas, por ello se hace uso de reactores específicos similares a los usados en la gasificación, pudiendo ser de tipo horno, tambor rotativo, lechos fijos, móviles y fluidizados, estos pueden llevar distintos tipos de pirólisis como lo son la pirolisis convencional, pirólisis instantánea (*Flash Pyrolisis*) y la pirólisis rápida (*Fast Pyrolisis*) (Castells & Velo, 2012).

6.2.3 Tipos de pirólisis

6.2.3.1. Pirólisis lenta (Carbonización)

Proceso que se lleva a cabo con el rango más bajo de temperaturas, aumenta la eficiencia de producción del carbón, trabajando con tiempos de residencia algo largos, el procesamiento puede llegar a tardar días (Munar et al., 2022).

Los tipos más comunes incluyen a la carbonización y al destilado de madera, pues son procesos que se han llevado a cabo durante millones de años de historia humana (Orrego Restrepo, 2021).

6.2.3.2. Pirólisis rápida

Eleva la velocidad de calentamiento de la biomasa y disminuye el tiempo de residencia, nos entrega como productos gases y líquidos

disminuyendo la cantidad de coque producida. No es necesario tamaños de partículas pequeños como en el siguiente tipo de pirólisis (Munar et al., 2022).

6.2.3.3. Pirólisis instantánea (*Flash Pyrolisis*)

Un proceso distinto a los convencionales, pues requiere de gran control en las temperaturas de trabajo. La transferencia de calor y masa, así como los cambios de fase toman mayor protagonismo, formando gases y coque, los gases al ser enfriados se condensan en un Bio-oil marrón oscuro, con la mitad del poder calorífico del diésel. Durante este proceso de debe evitar el uso de temperaturas medias-bajas (se lleva a cabo con temperaturas de 475-550°C), pues esto promueve la generación de coque, y el objetivo principal de este proceso es la generación de gas que se transformará en Bio-oil, por ello se suele establecer sistemas de reactores de lecho fluidizado (Klug, 2012).

Este proceso brinda un rendimiento de casi el 75% con respecto a la masa de materia usada. Se puede usar los subproductos para calentar el sistema y así solo obtener Bio-oil junto a gases de combustión disminuyendo gastos eléctricos (Klug, 2012).

Tabla 6. Rendimientos típicos de productos (base madera seca) obtenidos por los diferentes modos de pirólisis de la madera.

Modo	Condiciones	Líquido	Carbón	Gas*
Gasificación	~800°C	5%	20%	85%
Flash/Rápida	~500°C, corto tiempo de residencia del vapor caliente ~1s	75%	12%	13%
Intermedio	~500°C, tiempo de residencia del vapor caliente ~10 - 30s	50%	25%	25%
Carbonzación lenta	~400°C, largo tiempo de residencia del vapor ~horas - días	30%	35%	35%
Torrefacción lenta	~290°C, tiempo de residencia de sólidos ~30min	- - - - - - -	82%	18%

* La composición del gas puede variar fuertemente dependiendo de la materia prima y las condiciones del proceso. Los componentes típicos son: nitrógeno y dióxido de carbono (hasta 60%), hidrógeno hasta (5%), monóxido de carbono (hasta 35%) e hidrocarburos superiores (hasta 10%)

Fuente: Klug (2012).

Ejemplo de Uso

Mediante experimentación llevada a cabo en la PUCP, se estructuró un reactor que hace uso de biomasa como la borra de café, para generar productos combustibles, el reactor es de tipo lecho fluidizado que tiene

por objetivo calentar de manera controlada, uniforme y rápida a los reactivos, esto se logra mediante un flujo de nitrógeno gaseoso que al pasar entre las partículas de cuarzo cristalino de 350-450.m cambian el comportamiento del sólido arenoso en un cuasi-líquido. Se calienta el contenido interno mediante resistencias eléctricas y se evita salida de calor con capas aislantes. La salida del reactor cuenta con un ciclón para separar sólidos (coque) y gases, la parte de gases por una columna de enfriamiento que vuelve líquido al bio-oil y mantiene gaseoso a otros gases que también se recolectan. Este proceso y reactor obtiene una fracción de bio-oil líquido que se separa en dos fases (Klug, 2012).

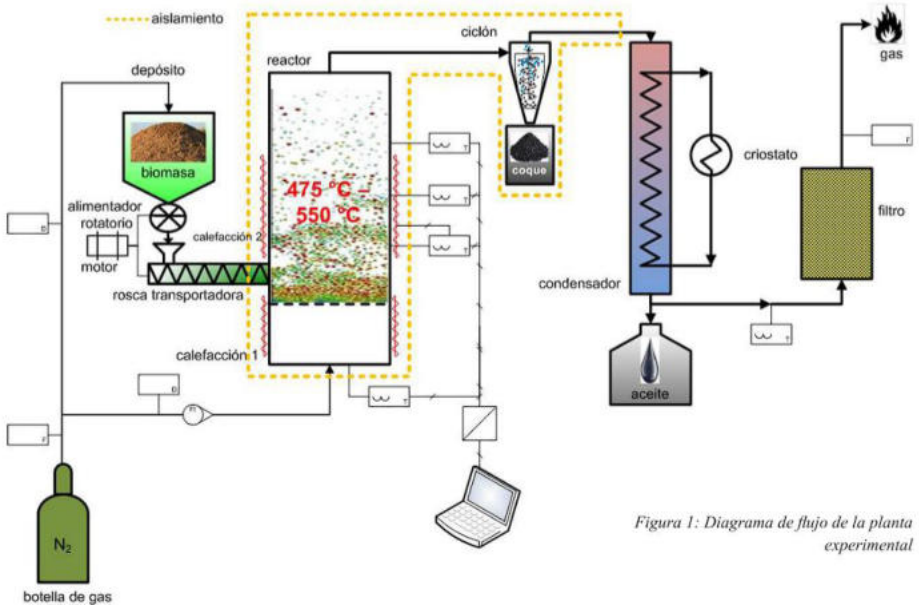


Figura 39. Diagrama de flujo de la planta experimental.

Fuente: Klug (2012).

CAPÍTULO VII

7. PROCESOS MODERNOS DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL CON BIOCATALIZADORES

El biodiesel es un biocombustible que puede ser producido a partir de aceites vegetales, grasas animales o microorganismos oleaginosos como hongos, levaduras, microalgas y bacterias, las cuales se encuentran en capacidad de producir lípidos o biocatalizadores que puedan ser empleados en las reacciones de transesterificación para la obtención de este tipo de combustible (Goh et al., 2020). En el cual destacamos las ventajas de la producción de biodiésel enzimático; proceso que opera a temperatura ambiente, se eliminan los costos asociados a la recuperación del catalizador químico precipitado, la posibilidad del reúso de la enzima, alta especificidad de la enzima por el sustrato, la habilidad de la enzima de esterificar no sólo ácidos grasos libres, sino también triglicéridos directamente en un solo paso, uso de una menor relación alcohol/aceite, la eliminación de reacciones colaterales y la minimización de impurezas, la más fácil separación y recuperación del producto, la degradabilidad del biodiésel y su compatibilidad medioambiental (Alcalá et al., 2018).

Ferrero et al. (2015) desarrollaron un biocatalizador mediante la inmovilización enzimática en soportes sólidos nanoestructurados, para su aplicación específica en la producción de biocombustibles a partir de materias primas renovables. Específicamente, el propósito principal fue inmovilizar la enzima lipasa de Pseudomonas fluorescens en el material mesoporoso SBA-15 (Santa Barbara Amorphous), sintetizado mediante

tratamiento hidrotérmico, para la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales. La enzima fue inmovilizada mezclando el material SBA-15 con una solución enzimática en agitación para lograr la inmovilización por absorción física.

En la figura 40 podemos ver que la inmovilización de la enzima se realizó mezclando el material SBA-15 con una solución enzimática en buffer fosfato 25mM, pH=8 y se mantuvo en agitación por 24 h a temperatura ambiente.

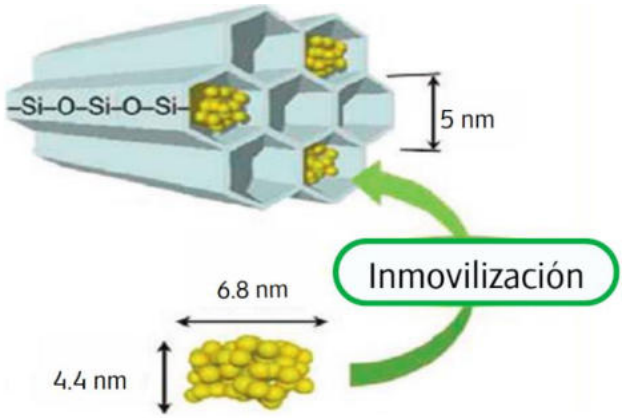


Figura 40. Modelo propuesto de la encapsulación enzimática.

Fuente: Ferrero et al. (2015).

La eficacia de la inmovilización enzimática se analizó mediante el método de Bradford, cuantificando las proteínas libres que no quedaron adheridas al soporte. La ausencia de enzima en la fracción sobrenadante confirmó una interacción efectiva entre el material y la proteína, lo que indica que el proceso de inmovilización fue exitoso. Se logró un 74% de producción de etilésteres luego de 24h de reacción a 37 °C con agitación orbital a 180 rpm con 66% de agua respecto del

biocatalizador, 8/1 relación etanol/aceite y 100 mg enzima/125 mg de SBA-15 (Ferrero et al., 2015).

En la Figura 41, se muestra la conversión de aceite de girasol a etilésteres durante 2 o 24 horas de reacción con diferentes cantidades de agua respecto al peso del biocatalizador. Así, un contenido del 66% de agua resultó la cantidad óptima para lograr la mayor actividad a ambos tiempos.

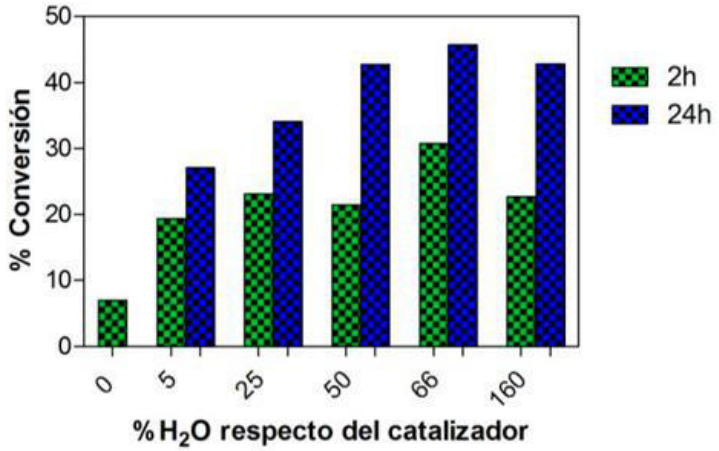


Figura 41. Evaluación catalítica del biocatalizador en función de la cantidad de agua. Condiciones de reacción: 2g aceite girasol, 1 ml etanol absoluto, 84 µl de agua, 2h a 37 °C y 180 rpm.

Fuente: Ferrero et al. (2015).

Costa & Silva et al. (2016), en su estudio, el diseño experimental consistió en un reactor de lecho empacado de dos etapas que incorpora una columna con resina catiónica (Lewatit GF 202) para eliminar el glicerol formado como subproducto y el rendimiento del reactor se cuantificó para tres velocidades de flujo diferentes correspondientes a

espacios-tiempos de 10 a 14 h. Durante la síntesis de biodiésel mediante lipasas inmovilizadas, la acumulación de glicerol puede afectar significativamente la velocidad de reacción. Esto ocurre porque el glicerol forma una capa hidrófila alrededor del catalizador, lo que restringe la transferencia de masa del sustrato hacia la enzima, reduciendo así la eficiencia del proceso (Xu et al., 2011). El reactor de lecho empacado continúo conectado en serie con remoción simultánea de glicerol tiene un gran potencial para alcanzar un alto nivel de rendimientos de transesterificación, aumentando la productividad del biodiésel. Costa y Silva et al. (2016) demostraron que es posible operar un sistema continuo para la producción enzimática de biodiésel a partir de aceite de coco utilizando dos PBR conectados en serie. La estrategia de incorporar un dispositivo para la remoción de glicerol entre las columnas minimizó los problemas de limitación difusional e inactivación de la lipasa inmovilizada dentro de la segunda etapa.

Los ésteres etílicos (FAEE) formados en las reacciones de transesterificación se analizaron en una cromatografía de gases FID (Varian CG 3800, Inc. Corporate Headquarters, Palo Alto, CA, EE. UU.). Las muestras recolectadas se purificaron, luego se evaporaron mediante un evaporador rotatorio a 80 °C para eliminar el etanol residual; por consiguiente, las muestras de biodiésel purificadas se secaron agregando sulfato de sodio (Costa & Silva et al., 2016).

En la Figura 42 podemos observar el diagrama esquemático del aparato experimental de lecho empacado: 1 baño termostático, 2 agitador magnético, 3 depósito de sustrato, 4 bomba peristáltica, 5 PBR—reactor

de lecho empacado, 6 columna con Lewatit GF 202 para eliminar el glicerol formado, 7 salida de producto.

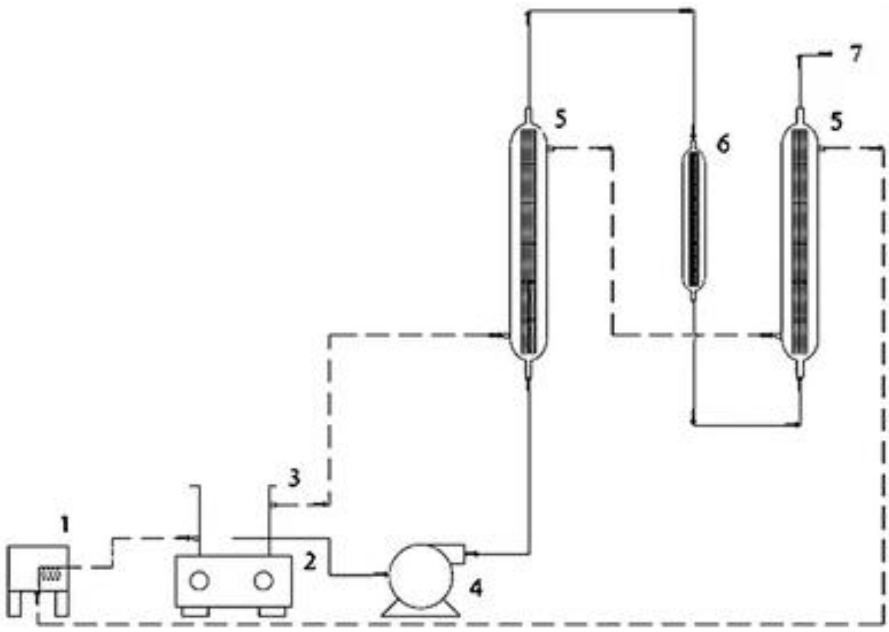


Figura 42. Diagrama esquemático del aparato experimental de lecho empacado.

Fuente: Costa & Silva et al. (2016).

Simões et al. (2015) en su estudio acerca de la reacción de transesterificación de aceite de babasú con etanol mediada por la lipasa *de Burkholderia cepacia* inmovilizada en un compuesto de SiO2 - PVA, el cual evaluó en un reactor de lecho empacado que funcionaba en modo continuo. Realizó los experimentos en un sistema sin solventes a 50 °C. El rendimiento del reactor (14 mm × 210 mm) se evaluó utilizando aceite de babasú y etano en dos proporciones molares de 1:7 y 1:12. Se destaca que el rendimiento de transesterificación más alto de 96,0 ± 0,9% y la productividad de 41,1 ± 1,6 $mg_{éster}\ g_{catalizador}^{-1}\ h^{-1}$ se lograron

en la relación molar de aceite a etanol de 1:12 y para tiempos espaciales iguales o superiores a 11 h. Además, la lipasa inmovilizada se encontró estable con respecto a sus características catalíticas, exhibiendo una vida media de 32 días.

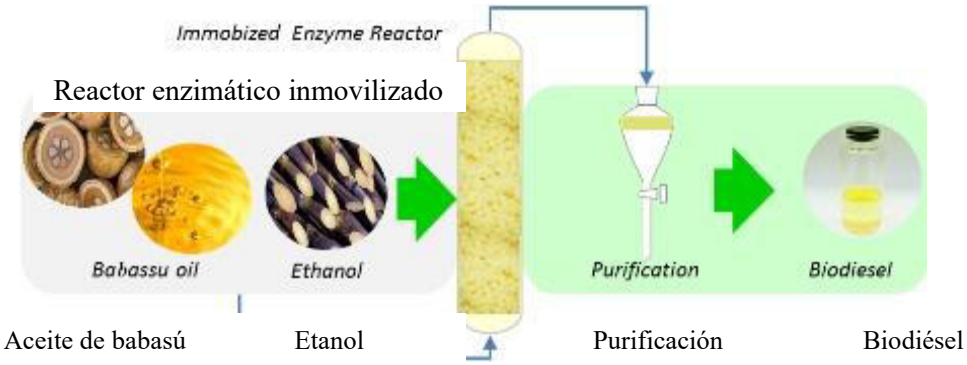


Figura 43. Transesterificación de aceite de babasú con etanol.

Fuente: Adaptación de Simões et al. (2015).

El reactor de lecho empacado desarrollado para este estudio consiste en una columna cilíndrica de perspex con un diámetro de 2,5 cm y una altura de 25 cm, extendiéndose hasta 40 cm, diseñada específicamente para evaluar el impacto de la altura del lecho en la producción de biodiésel, como se ilustra en la Figura 44. Este reactor se empleó en investigaciones sobre la producción continua de biodiésel a partir de aceites de karanja y jatropha, utilizando biocatalizadores inmovilizados en combinación. La columna de lecho empacado alberga perlas inmovilizadas que contienen células de *Rhizopus oryzae* y lipasa de *Candida rugosa* en una proporción establecida. Para garantizar la retención efectiva de las perlas dentro de la columna, se incorporaron mallas de alambre en la parte superior e inferior del sistema. La

alimentación del reactor consiste en una mezcla de aceite crudo y metanol, la cual es bombeada a un caudal predefinido según la metodología de Diseño Compuesto Central (CCD). Este flujo asciende a través de la columna mediante una bomba peristáltica a una velocidad controlada. Posteriormente, el flujo de salida se recircula y se combina nuevamente con el flujo de entrada en el depósito de almacenamiento de reactivos, asegurando así una operación continua y eficiente del sistema (Bakkiyaraj et al., 2015).

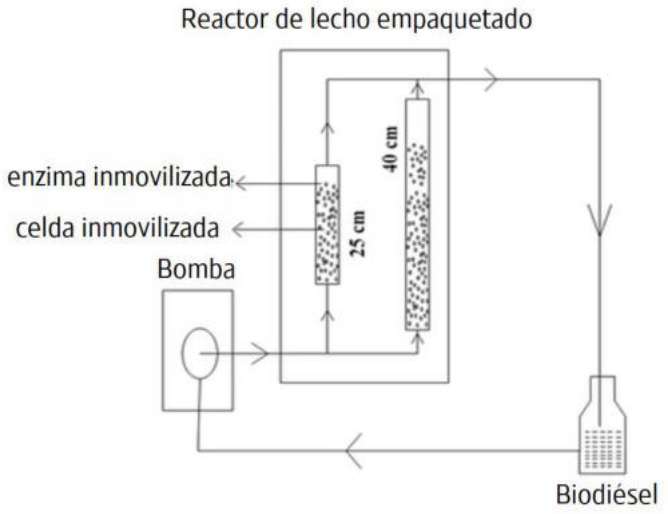


Figura 44. Producción de biodiesel a partir de aceites no comestibles utilizando biocatalizadores inmovilizados mixtos.

Fuente: Bakkiyaraj et al. (2015).

El análisis económico preliminar mostró que la mayor contribución está asociada con el biocatalizador (enzima), pero no con la celda completa, y la reutilización de estos biocatalizadores en dos o tres reacciones del proceso generaría un costo de producción de biodiésel aceptable (para una materia prima de bajo costo), lo que sugiere un medio favorable de

producción de biodiésel para aplicación industrial (Bakkiyaraj et al., 2015).

CAPÍTULO VIII

8. PROCESOS DE TORREFACCIÓN

El proceso de pretratamiento térmico conocido como torrefacción ayuda a reducir la variabilidad de la biomasa en términos de sus propiedades físicas y composición química, aumenta su contenido energético, disminuye su contenido de humedad y reduce su degradación biológica (Tumuluru et al., 2021).

El proceso de torrefacción en la actualidad cada día está ganando más relevancia en el camino hacia una economía más sostenible. Este proceso básicamente consiste en un tratamiento térmico donde la biomasa se calienta en un ambiente sin oxígeno para eliminar la humedad y ciertos compuestos volátiles. Como resultado, se obtiene un material sólido parecido al carbón, conocido como biocarbón o biomasa torrefactada, con un mayor poder energético y más resistencia a la degradación (BioEconomía.info, 2023).

Este proceso es similar a un "tueste" controlado, en el que la biomasa se calienta a temperaturas moderadas (entre 200 y 300 °C) en un ambiente con gases inertes como el nitrógeno o el argón. Durante este calentamiento, la estructura de la biomasa cambia significativamente debido a la descomposición parcial de algunos de sus componentes principales: la celulosa, la hemicelulosa y la lignina.

El proceso de torrefacción es aplicable a una amplia variedad de biomasas lignocelulósicas, que incluyen residuos agrícolas como el bagazo de caña, la paja de trigo y las cáscaras de arroz, así como

residuos forestales tales como el aserrín, la corteza y las ramas. También pueden emplearse residuos industriales y urbanos, entre ellos los provenientes de la carpintería y la industria de la celulosa, y, en menor proporción, algunas fuentes de biomasa acuática como macroalgas y jacinto de agua (Prins et al., 2006).

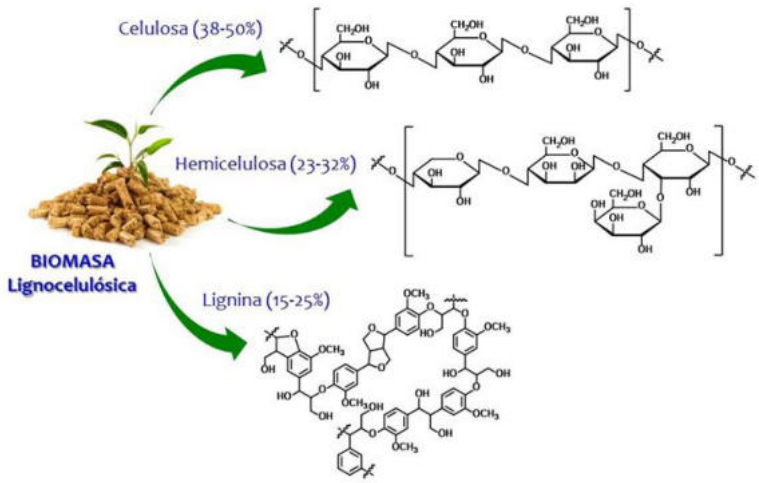


Figura 45. Biopolímeros que componen la biomasa lignocelulósica y los porcentajes comúnmente encontrados en la madera.

Fuente: Chávez et al. (2019).

La biomasa está ganando importancia como fuente de energía debido al aumento en los precios de los combustibles fósiles y a las nuevas políticas ambientales. Tanto en países desarrollados como en países en desarrollo, se considera un recurso clave dentro de las estrategias energéticas. Sin embargo, su uso como combustible presenta algunas desventajas, como su bajo poder calorífico, alto contenido de humedad y tendencia a absorber agua del ambiente (Vargas et al., 2021).

La hemicelulosa es el compuesto que se descompone mayoritariamente en el proceso de torrefacción. Para mejorar sus propiedades como combustible, se emplea la torrefacción, un proceso en el que la biomasa se calienta lentamente en una atmósfera sin oxígeno hasta alcanzar un máximo de 300 °C. Este tratamiento produce un material sólido más uniforme, con menor humedad y un mayor poder calorífico en comparación con la biomasa original. También se le conoce como una forma moderada de pirólisis, ya que elimina los compuestos responsables del humo y conserva aproximadamente el 70 % del peso inicial y entre el 80 y 90 % de la energía contenida en la biomasa (Trasobares & Meza., 2011). En otras palabras, la torrefacción permite transformar residuos vegetales en una fuente de energía más eficiente y sostenible, facilitando su almacenamiento, transporte y uso como biocombustible (Pimsamarn et al., 2024).

Durante la torrefacción, primero ocurre el secado de la materia orgánica luego de haber sido calentada, ya que esto removerá grandes cantidades de agua a través de reacciones termoquímicas que comienzan alrededor de los 160 °C. A medida que la temperatura aumenta entre 180 y 270 °C, se produce una reacción exotérmica y se descompone la hemicelulosa. En esta etapa, la biomasa se tuesta, liberando humedad, dióxido de carbono (CO_2), ácido acético y algunos fenoles, compuestos con bajo valor energético. (Ferro et al., 2009).

La biomasa sometida a torrefacción puede reemplazar al carbón vegetal en diversas aplicaciones, como la producción de pellets, que se puede observar en la figura 35, y briquetas para usos domésticos y comerciales. También es una alternativa viable para la industria, ya que,

con un contenido de carbón fijo del 30-35 %, funciona como un excelente agente reductor. (Trasobares & Meza, 2011). Es como si la biomasa se estuviera aligerando, dejando atrás elementos innecesarios en su conversión hacia un combustible más eficiente (Garrido et al., 2020).



Figura 46. Biocombustibles sólidos a partir de biomasa residual.

Fuente: Cener BIO2C (2024).

Además, la biomasa torrada se puede mezclar con carbón mineral y utilizarse en calderas de carbón pulverizado. Una de sus principales ventajas frente a la madera sin tratar es su mayor uniformidad. Gracias a su bajo contenido de humedad, la calidad del combustible mejora y los costos de transporte se reducen. Estas características también pueden optimizar el rendimiento de los gasificadores, al aportar mayor estabilidad al proceso (Trasobares & Meza, 2011).

Durante el proceso también tiene lugar otras modificaciones en su composición, por ejemplo, se eliminan ciertas estructuras químicas, como los grupos carboxilo (-COOH) y metilo ($-CH_3$), en un proceso conocido como descarboxilación y desmetilación. Esto reduce la cantidad de oxígeno en la biomasa y aumenta su proporción de carbono,

lo que mejora su capacidad energética y la hace más útil como biocombustible (Pimsamarn et al., 2024).

Un punto importante es que cuando la temperatura aumenta dentro del rango de torrefacción, la lignina, que es la parte que le da estructura y resistencia a la biomasa, experimenta un reordenamiento. A través de procesos de policondensación y reticulación, se vuelve más compacta y estable. Como resultado, el material final es más denso, resistente a la degradación y menos propenso a absorber humedad, lo que facilita su almacenamiento y transporte sin comprometer su calidad (Pimsamarn et al., 2024).

$$Biomasa(C_X H_Y O_Z) \rightarrow C_{Torrefactado} + CO_2 + CO + H_2O + Comp.org\acute{a}nico\ vol\acute{a}til \quad \boldsymbol{Ec.22}$$

En la Figura 47, se muestra de manera comparativa cómo la biomasa cambia antes y después de someterse al proceso de torrefacción, resaltando las mejoras en sus propiedades. Durante la torrefacción, la biomasa pierde alrededor del 30% de su masa en forma de compuestos volátiles, aunque estos apenas representan una pequeña parte de su contenido energético. Sin embargo, el material restante conserva el 70% de su peso original y retiene aproximadamente el 90% de su energía, lo que lo convierte en un recurso más eficiente para su uso como biocombustible. Uno de los principales beneficios de este proceso es la drástica reducción de la humedad, que desciende a valores inferiores al 3%, mejorando significativamente su estabilidad y facilitando su almacenamiento sin riesgo de deterioro. Como resultado, la biomasa

torrefactada se vuelve más homogénea, resistente a la humedad y con un mejor rendimiento energético (Garrido et al., 2020).

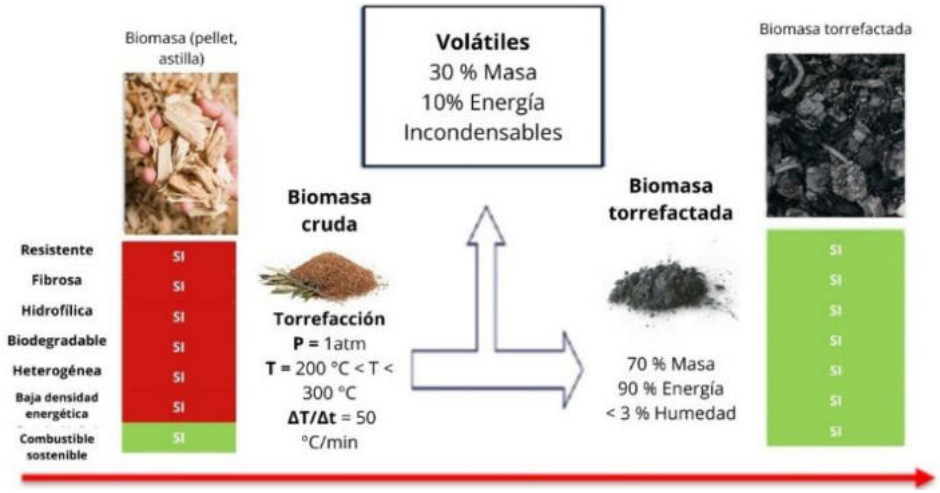


Figura 47. Esquema del balance de masa en la torrefacción.

Fuente: Garrido et al. (2020).

La torrefacción de biomasa es una técnica que mejora sus propiedades como biocombustible, pero requiere una inversión significativa. El costo de la infraestructura depende del tipo de reactor utilizado, con montos que pueden oscilar entre 27 y 53 millones de dólares, siendo los reactores de lecho móvil más accesibles en comparación con los de tornillo sin fin. En cuanto a los costos de operación, la biomasa utilizada como materia prima tiene un precio aproximado de 0,016 dólares por kilogramo, aunque este valor varía según la región y el tipo de biomasa disponible. Además, los gastos en energía y mantenimiento dependen de la eficiencia del equipo y las tarifas eléctricas del lugar. Se estima que la producción de energía con un reactor de lecho móvil cuesta alrededor de 2,9 dólares por gigajulio (GJ) (Arteaga et al., 2015).

Existen diferentes tipos de torrefacción cada una con diferentes propiedades, sin embargo, las más destacadas y utilizadas en el campo son la torrefacción seca y la torrefacción húmeda, ambas tienen como objetivo mejorar la calidad de la biomasa para la transformación a biocombustible, sin embargo, presentan diferencias en cuanto a eficiencia, composición y aplicación (Arteaga et al., 2015).

Si se considera la cantidad de material que se conserva tras el proceso, la torrefacción seca es más eficiente, ya que permite retener hasta el 90% de la biomasa original, mientras que la torrefacción húmeda mantiene alrededor de un 79.7%. Sin embargo, el bio-carbón obtenido mediante torrefacción húmeda tiene un mayor poder calorífico (26.3 MJ/kg), acercándose a la energía que proporciona el carbón mineral de rango medio (29.3 MJ/kg). Esto lo convierte en una opción más atractiva cuando se busca un combustible de alto rendimiento (Arteaga et al., 2015).

A nivel químico, la torrefacción húmeda tiene la ventaja de eliminar ciertas impurezas gracias a la acción del agua, lo que hace que el bio-carbón resultante tenga menos oxígeno y más carbono, volviéndose más resistente a la degradación y menos propenso a absorber humedad. En contraste, la torrefacción seca conserva una mayor cantidad de la biomasa original, pero el material sigue siendo más vulnerable a la humedad, lo que puede afectar su almacenamiento y uso a largo plazo (Arteaga et al., 2015).

Desde el punto de vista técnico, la torrefacción húmeda requiere equipos especiales capaces de soportar altas presiones y la corrosión, lo

que hace que su instalación y mantenimiento sean más costosos. A pesar de esto, su capacidad para generar un biocombustible de mejor calidad la hace ideal para procesos más avanzados, como la gasificación y la producción de biocombustibles sintéticos. En cambio, la torrefacción seca es un método más simple y económico, perfecto para producir biocombustibles sólidos sin necesidad de una infraestructura compleja (Arteaga et al., 2015).

Cada país de América del Sur deberá evaluar y determinar las mejores condiciones de recolección, transporte, almacenamiento, transformación de la biomasa y entrega de los bioplásticos, debido principalmente a que estos factores son determinantes en la evaluación de los costos de inversión y operación de este tipo de bioindustrias (Vargas et al., 2021).



Figura 48. Materia prima (residuos forestales) almacenada para torrefacción.

Fuente: Cener BIO2C (2024).

En la Figura 47, se muestra una representación esquemática del proceso de torrefacción, donde se muestran todas las ventajas asociadas a cambios en las propiedades fisicoquímicas.

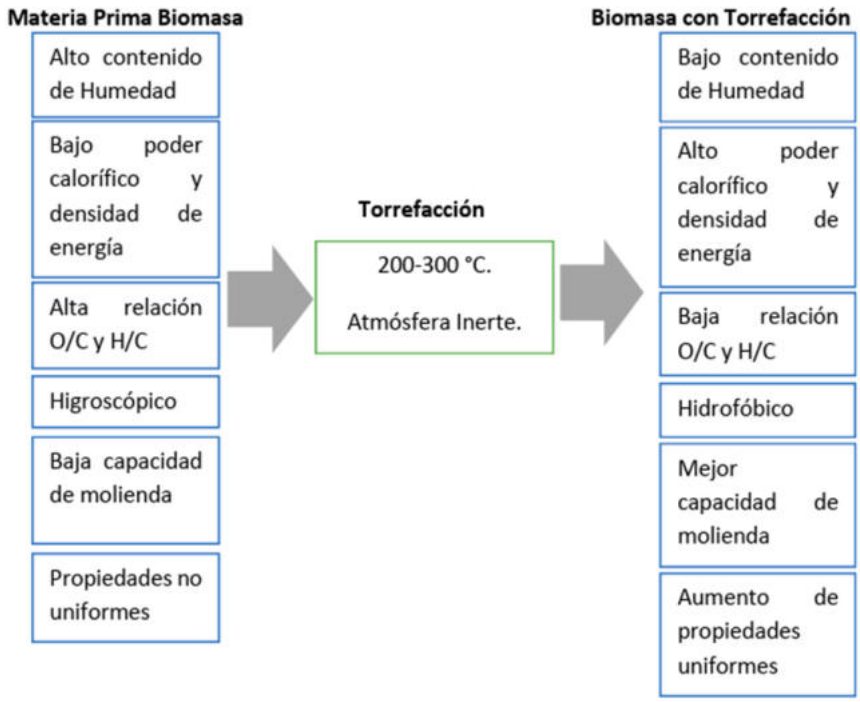


Figura 49. Representación esquemática del proceso de torrefacción.

Fuente: Chen et al. (2015).

8.1 Planta de torrefacción

Una planta de procesamiento de biomasa está compuesta por varios equipos encargados de llevar a cabo las operaciones necesarias para obtener el producto deseado. En la Figura 37 se presenta un esquema general de la planta, donde se pueden observar las diferentes unidades

de procesamiento y sus interconexiones. A continuación, se describen las funciones de los principales equipos:

- **Secadero:** Se encarga de reducir el contenido de humedad de la biomasa. Existen distintas opciones para este proceso, como secaderos de túnel, rotativos o de bandejas, dependiendo del tipo de contacto entre fases.
- **Horno:** Es la unidad donde se realiza la combustión de un combustible, que puede incluir vapores de torrefacción y un comburente como el aire. Su función principal es generar la energía térmica necesaria para el proceso.
- **Torrefactor:** Es el reactor donde ocurre la descomposición térmica de la biomasa, obteniendo biomasa torrefactada junto con gases y compuestos volátiles, como se explicó en el capítulo anterior.
- **Intercambiador de calor:** Su función es transferir la energía generada en el horno al secadero y al torrefactor, asegurando el correcto funcionamiento de ambos procesos.
- **Molino:** Se encarga de reducir el tamaño de las partículas de biomasa hasta alcanzar la granulometría deseada.
- **Unidad de recuperación de la caída de presión:** Permite reutilizar el flujo de salida del torrefactor, dirigiéndolo al intercambiador de calor, evitando la formación de un bypass y mejorando la eficiencia del sistema.

La Tabla 7 presenta una tabla ilustrativa del proceso de torrefacción, destacando las ventajas derivadas de las modificaciones en las propiedades fisicoquímicas.

Tabla 7. Descripciones de un sistema de reacción de torrefacción.

Proceso	Descripción
Selección y análisis de materias primas	La selección de la materia prima dará lugar a diferentes resultados. Por lo tanto, se requieren caracterizaciones básicas para identificar las composiciones de la materia prima, que incluyen principalmente análisis proximal, análisis elemental y análisis de composición, etc.
Adopción previa al tratamiento	Para mejorar la eficiencia del proceso de torrefacción, el pretratamiento de la materia prima es un paso esencial. Por ejemplo, el proceso de secado para eliminar el agua intrínseca y la molienda de la materia prima para aumentar el área de reacción de las partículas son los pretratamientos comunes que se adoptan antes de la torrefacción.
Selección del reactor	Se han desarrollado varios tipos de reactores, como los de tipo discontinuo o los de tipo continuo. Cada tipo de reactor tiene sus ventajas y desventajas, y la selección del reactor depende de los requisitos y el propósito del usuario.
Postratamiento de los productos	Para mejorar aún más las cualidades de los productos torrefactos en términos de mayor densidad energética, transporte conveniente y manipulación, se utiliza un postratamiento como la densificación.

Fuente: Chen et al. (2021).

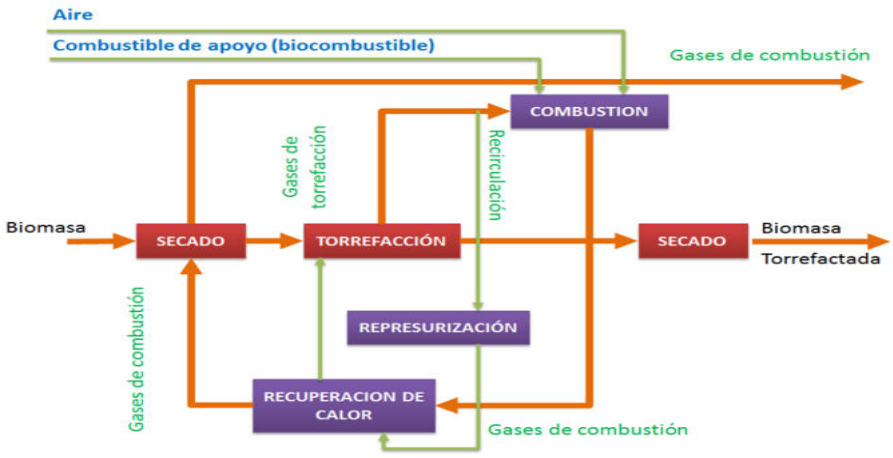


Figura 50. Esquema de planta de torrefacción industrial.

Fuente: Díaz (2012).



Figura 51. Instalaciones de torrefacción - CENER BIO2C.

Fuente: Cener BIO2C (2024).



Figura 52. Planta de pretratamiento de biomasa sólida.

Fuente: Cener BIO2C (2024).

Mejorar la biomasa y producir combustibles sólidos que tengan una alta calidad ha sido el objetivo del proceso de torrefacción. Para que se lleve a cabo, la biomasa se torrefica en condiciones húmedas o secas, que se denominan torrefacción húmeda y torrefacción seca, respectivamente. En la torrefacción húmeda, la biomasa se mejora con agua y soluciones ácidas diluidas a temperaturas de 180-260 °C. Por el contrario, en la torrefacción seca, la biomasa se puede torreficar en atmósferas secas y no oxidativas (inertes) u oxidativas donde la temperatura normalmente está entre 200 °C y 300 °C. Además de los dos métodos mencionados anteriormente, la biomasa también se puede tratar con vapor para mejorar sus propiedades (Chen et al., 2021). La clasificación de los métodos de torrefacción se muestra en la Figura 53.

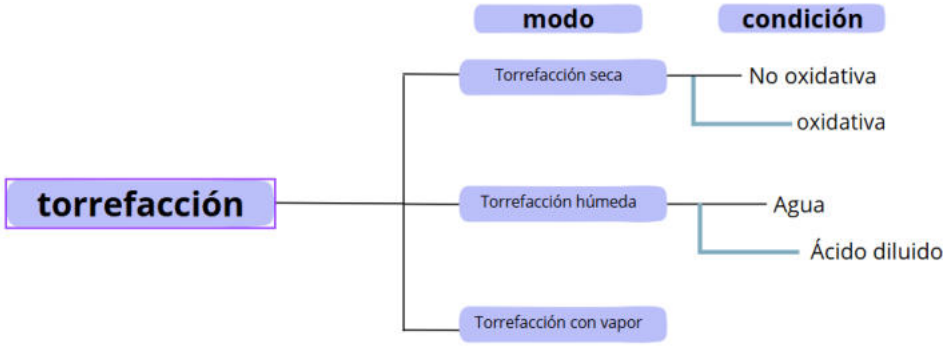


Figura 53. Clasificación de los métodos de torrefacción.

Fuente: Chen et al. (2021).

8.1.1 Torrefacción en seco

La torrefacción seca es un pretratamiento termoquímico, en el que la estructura original de la biomasa se destruye totalmente a medida que se calienta (<50ºC/min) hasta 200– 300ºC. Durante este proceso, las moléculas de celulosa, hemicelulosa y, en menor grado, la lignina se degrada en diferentes etapas o regímenes térmicos. La remoción de la humedad, la depolimerización de la hemicelulosa y la descomposición de la lignina son los fenómenos físicos y químicos que controlan el proceso y hacen que las relaciones atómicas O/C y O/H del sólido se asemejen a las del carbón (Arteaga et al., 2016). El resultado es un producto sólido con propiedades hidrofóbicas y bioresistentes, que se tritura con facilidad y conserva entre el 70% y 90% del poder calorífico de la biomasa original, mientras mantiene menos del 80% de su peso. En la torrefacción no oxidativa, se ha utilizado como gases portadores al dióxido de carbono y nitrógeno, el cual es el más comúnmente utilizado para barrer materiales de biomasa cuando se pretratan

térmicamente. En la torrefacción oxidativa, se han realizado intentos utilizando gases portadores como gas de combustión, aire y otros gases que contienen diferentes concentraciones de oxígeno (Uemura et al., 2013) utilizados para pretratar la biomasa. La torrefacción oxidativa tiene una tasa de reacción más alta que la de la torrefacción no oxidativa, esto a causa de la presencia de oxígeno y las reacciones exotérmicas ocurridas en la degradación térmica, lo cual acorta la duración de la torrefacción. El uso de gas de combustión o aire para torrefactar biomasa puede reducir los costos operativos porque no se requiere la separación de nitrógeno del aire. Las propiedades de combustible de la biomasa torrefactada por un gas de barrido junto con bajas concentraciones de oxígeno (<6 vol%) son cercanas a las torrefactadas por nitrógeno (Basu et al., 2013). Sin embargo, la torrefacción oxidativa obtiene un rendimiento sólido menor en comparación con la torrefacción no oxidativa (Wang et al., 2013). También se encontró que el valor calorífico superior (HHV) de la biomasa torrefacta disminuye con el aumento de la concentración de oxígeno cuando se torrefacta a una temperatura de 300 °C (Kuo et al., 2014).

Tabla 8. Comparación de la torrefacción no oxidativa y oxidativa.

Torrefacción no oxidativa	**Torrefacción oxidativa**
Ventajas	**Ventajas**

Mayores rendimientos sólidos y energéticos. Más fácil control de temperatura.	Menor costo operativo (sin costo de separación de N_2). Menor suministro de calor. Velocidad de reacción más rápida.
Desventajas	**Desventajas**
Mayor requerimiento de calor. Menor velocidad de reacción. El N2 debe separarse del aire.	Menor rendimiento de sólidos y de energía (a altas temperaturas de torrefacción). Mayor dificultad en el control de la temperatura.

Fuente: Chen et al. (2021).

8.1.2 Torrefacción húmeda

La torrefacción húmeda o carbonización hidrotermal (CHT) es un proceso de carbonización artificial que ocurre entre 175 y 250 ºC en un medio acuoso a presión de saturación (20-60 bar) o ligeramente superior (Erlach et al., 2012). En lugar de mejorar la biomasa en medios secos, también se puede pretratar en medios húmedos como ácido diluido y agua para mejorar la biomasa, y el sólido producido se llama "hidrocarbón" (Chen et al., 2015). Permiten procesar una amplia gama de biomasas: residuos sólidos, sólidos municipales, biomasa forestal, residuos agrícolas, paja de cereales, etc. Durante el tratamiento, ocurren reacciones de hidrólisis, aromatización, decarboxilación, deshidratación y condensación que modifican las relaciones O/C y O/H del sólido, reduciendo notablemente la cantidad de oxígeno. Como resultado, se obtiene un sólido hidrofóbico que retiene entre el 80-95% del poder calorífico del material original en aproximadamente el 55-90% de su peso y una corriente gaseosa compuesta principalmente por

CO2. En el medio de reacción (solución acuosa) queda disuelta alrededor del 10% de la masa inicial en forma de ácidos carboxílicos, compuestos fenólicos, monosacáridos y furfurales (Chen et al., 2021).

Desde el punto de vista del consumo de energía, la torrefacción húmeda no requiere presecado, por lo que supone un mayor ahorro energético en el muestreo en comparación con la torrefacción seca. Sin embargo, ocurre lo contrario en los procesos de recolección de productos, lo que indica que tienen un compromiso en el consumo de energía (Chen et al., 2015).

8.1.3 Torrefacción con vapor

Aparte de las torrefacciones secas y húmedas, la torrefacción con vapor también es un proceso de torrefacción que utiliza una explosión de vapor a alta temperatura y alta presión para torrefactar la biomasa (Balat et al., 2008). El proceso introduce vapor a alta presión y alta temperatura en una cámara sellada que coloca materia prima lignocelulósica y generalmente se lleva a cabo a temperaturas de 200-260 °C y un tiempo de retención de 5-10 min. Posteriormente, la presión se libera rápidamente, lo que hará que el vapor hinche la matriz lignocelulósica y separe las fibras individuales junto con una ligera pérdida de materia prima (Mabee et al., 2006). La torrefacción con vapor también tiene el mérito de permitir aumentar el valor calorífico, el contenido de carbono y la hidrofobicidad a temperaturas mucho más bajas y duraciones de tratamiento más cortas en comparación con la torrefacción en seco.

Los procesos de torrefacción difieren dependiendo del tipo de reactor utilizado y el nivel de integración energética. La mayoría de estos se han desarrollado a partir de tecnologías previas (como el secado), y los principales desafíos relacionados con estas tecnologías se centran en integrar el proceso de manera eficiente en términos energéticos, procesar materiales con diversas propiedades y tamaños de partícula y recuperar y tratar los efluentes gaseosos y líquidos producidos durante la descomposición de la biomasa (Cayo, 2018).

Tabla 9. Comparación de torrefacción seca, húmeda y con vapor.

	Torrefacción seca	**Torrefacción húmeda**	**Torrefacción al vapor**
Condiciones de funcionamiento	200-300 °C. 10-240 minutos. 1 atm.	180-260 °C. 5-240 minutos. 1-200 atm.	200-400 °C. 5-120 minutos. 1-40 atm.
Ventajas	Operación más sencilla. Sin post-secado. Producción continua.	Temperatura de reacción más baja. Adecuado para biomasa húmeda. Sin presecado. Subproductos en líquidos. Menor contenido de cenizas en hidrocarbón.	Adecuado para biomasa húmeda. Sin presecado. Productos sólidos de mayor paletización.

Desventajas	Presecado. Contenido de cenizas en el biocarbón.	Post-secado. Operación a alta presión. Corrosión del reactor por sales inorgánicas. El desafío de la producción continua.	Mayor consumo de energía. Operación a alta presión.

Fuente: Chen et al. (2021).

8.2 Reactores utilizados para torrefacción

En la actualidad, las tecnologías de torrefacción se desarrollan basándose en conceptos de reactores ya existentes, diseñados para otros procesos como el secado, la pirólisis o la gasificación. Estos reactores se adoptan y modifican para el proceso de torrefacción. El tipo de reactor se clasifica según el movimiento de la materia prima, los medios de transferencia de calor y los medios asistidos. Los reactores desarrollados en empresas comerciales o laboratorios de ampliación consisten en (1) reactor de tambor rotatorio; (2) reactor de lecho móvil; (3) reactor de tornillo; (4) reactor de hogares múltiples; (5) reactor de lecho fluidizado y otros como secador de banda, reactor y elevador eléctrico vibratorio (REVE), reactor de lecho empacado rotatorio y reactor de lecho en surtidor. No existe un mejor diseño de reactor adecuado para cualquier materia prima; por lo tanto, la selección adecuada del reactor es esencial en función de la materia prima dada. (Chen et al., 2021).

Los reactores para torrefacción se clasifican, según el método de contacto entre el sólido y el medio de calentamiento, en reactores de contacto directo o indirecto.

Tabla 10. Modelos de reactores para torrefacción.

Reactor	Ventajas	Limitaciones
Tambor rotatorio	Simple Baja caída de presión Operación en contacto directo o indirecto	Mala transferencia de calor. Difícil control de temperatura Mayor tamaño/capacidad Difícil escalada
Lecho móvil	Simple operación y construcción Alta densidad de lecho elevada transferencia de calor	Alta caída de presión Difícil control de temperatura
Tornillo	Posibilidad de flujo en pistón Tecnología madura	Calentamiento indirecto. Baja capacidad de transferencia de calor. Difícil escalada
Hogares múltiples	Diseños probados Fácil de escalar Facilidad para el control del tiempo de residencia y la temperatura.	Reactores de gran tamaño Difícil escalada

Lecho fluidizado	Eficiencia para transferencia de calor Escalable	Requiere partículas de pequeño diámetro. Requerimiento adicional de gas para fluidización.

Fuente: Arteaga et al. (2016).

El respaldo político también juega un papel fundamental en el desarrollo de esta tecnología. Muchos países, impulsados por objetivos de energía renovable y compromisos de reducción de carbono, buscan fuentes de energía más limpias y sostenibles. En este contexto, la torrefacción de biomasa encuentra su lugar, utilizando recursos locales y disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles (Thengane et al., 2022).

Jaramillo et al. (2022) examinaron el efecto de la temperatura en la torrefacción de aserrín de pino Cypress utilizando un reactor a escala de laboratorio. Los resultados mostraron una pérdida de masa significativa a medida que aumentaba la temperatura, atribuida principalmente a la descomposición de la hemicelulosa. Esta pérdida de masa fue más pronunciada a temperaturas más altas, alcanzando valores de hasta 27.4% a 275 °C.

La torrefacción del aserrín condujo a un incremento en el valor calorífico superior, alcanzando valores cercanos a los de lignitos. Este aumento se atribuye a la despolimerización de la hemicelulosa y a la condensación de la lignina, lo que resulta en un incremento en el contenido de carbono fijo. Los análisis de espectroscopía infrarroja revelaron una disminución en la intensidad de las bandas

correspondientes a grupos hidroxilo y carbonilo, lo que indica una reducción de la polaridad superficial y un aumento de la hidrofobicidad (Jaramillo et al. 2022).

La torrefacción de borra de café a temperaturas entre 225 °C y 275 °C resultó en una disminución significativa de la masa, principalmente debido a la pérdida de agua y la volatilización de compuestos orgánicos como ácidos carboxílicos y compuestos fenólicos. El análisis termogravimétrico mostró una pérdida de masa máxima del 26.6% a 275 °C. Paralelamente, se observó un aumento en el contenido de carbono fijo y una disminución del contenido de oxígeno e hidrógeno, lo que se tradujo en un incremento del poder calorífico superior del 12% a 275 °C. La espectroscopía infrarroja reveló una disminución en la intensidad de las bandas correspondientes a grupos hidroxilo y carbonilo, lo que indica una reducción de la polaridad superficial y un aumento de la hidrofobicidad. Estos resultados sugieren que la torrefacción es una tecnología prometedora para convertir la borra de café en un biocombustible sólido con propiedades similares al carbón, lo que permitiría valorizar este residuo y reducir su impacto ambiental (Jaramillo et al. 2022).

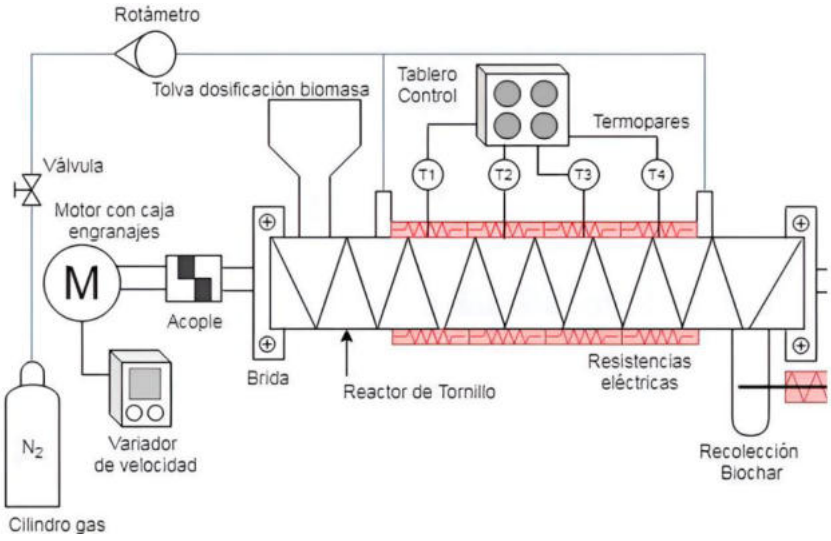


Figura 54 Esquema y fotografía del reactor de torrefacción de tornillo.

Fuente: Jaramillo et al. (2022).

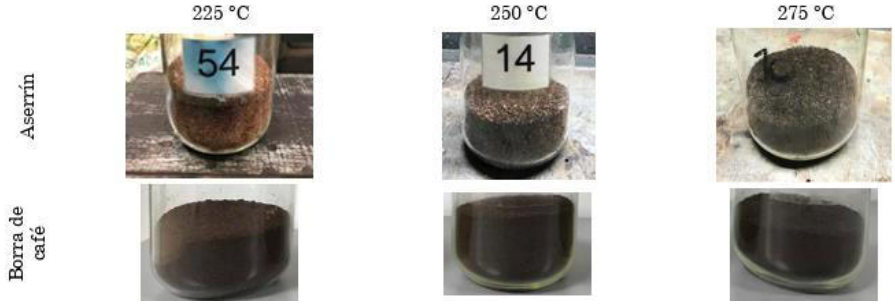


Figura 55. Muestras de aserrín y borra de café torrefactadas.

Fuente: Jaramillo et al. (2022).

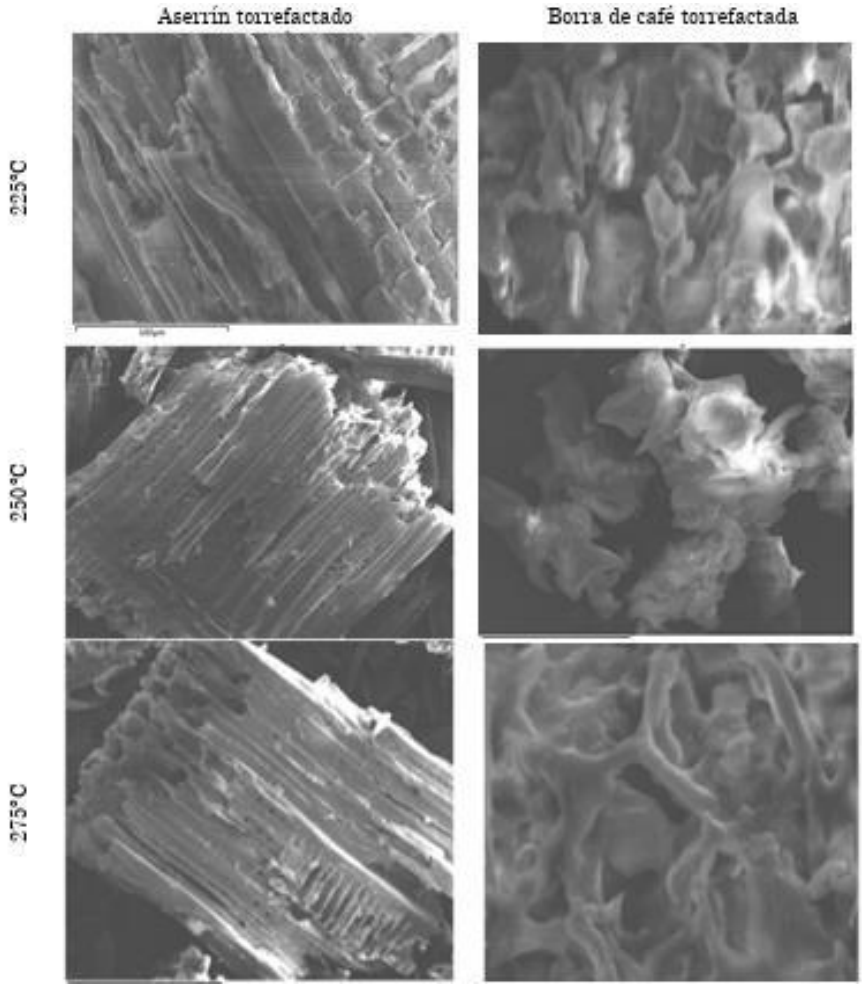


Figura 56. SEM de biocarbón de aserrín y de la borra de café a 225 °C, 250 °C y 275 °C.

Fuente: Jaramillo et al. (2022).

Jácome (2022) nos dice que en su estudio se utilizaron cáscaras de cacao como materia prima, la cual fue sometida a una serie de etapas que incluyen molienda, mezclado con agua en una relación 1:10, precalentamiento hasta 180 °C y reacción a 270 °C y 5,6 MPa en un reactor de alta presión. Mediante la información disponible sobre la

producción de almendra seca de cacao en el mercado ecuatoriano, se estableció una capacidad de procesamiento de 3,46 t/h de materia seca de cáscaras de cacao en la ciudad de Vinces, provincia de Los Ríos, ya que, es la provincia que registra una mayor producción a nivel nacional. De acuerdo con el balance de masa estimado, se prevé una producción de biocarbón como combustible sólido de 47 760,24 kg/día con una humedad del 8,0 % de características similares a las del carbón lignito y con un precio en el mercado de 636,34 USD/t.

En la Tabla 11, se describe el consumo y los costos de recursos que corresponden a los costos reales asociados con la operación de la planta diseñada en el estudio del diseño de una planta para la producción de biocarbón industrial, a partir de cáscaras de cacao por torrefacción húmeda.

Tabla 11. Costos directos de producción.

Recurso	**Consumo**	**Costo unitario**	**Costo (USD/año)**
Biomasa	203 857,50 t/año	0,00 USD/t	0,00
Energía eléctrica	99 200 597,42 kWh/año	0,00678 USD/kWh	6 725 800,51
Agua	680 133,30 m^3/año	2,30 USD/m^3	1 564 306,59
	Total		23 544 725,10

Fuente: Jácome (2022).

El costo de venta del biocarbón se determina como un 25 % extra al valor del costo de manufactura como parte de las ganancias; de manera que el costo de venta de cada tonelada de biocarbón se fija en un valor de 636,34 USD que resulta ser un precio de venta competitivo con los precios de venta del mercado internacional. Además, cabe mencionar que el costo del biocarbón varía de acuerdo con el sitio de producción, la tecnología de transformación y la materia prima empleada (Ahmed et al., 2016).

Tabla 12. Ingreso por ventas de biocarbón.

Producto	**Cantidad**	**Precio de venta (USD/t)**	**Ingreso total (USD/año)**
Biocarbón	17 193, 98	636,34	10 941 032,69

Fuente: Jácome (2022).

En la región de estudio, cultivar caña de azúcar significa también sostén económico de muchas familias y creación de empleos. Los costos de producción y la rentabilidad de este cultivo son factores clave para el desarrollo económico local (Rebollar, 2017).

El costo de la energía eléctrica para el sector industrial varía de acuerdo con el horario y el voltaje; en este caso se considera que la electricidad tiene un costo de 0,0678 USD/kWh (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2019, p. 35).

Para la transformación de cáscaras de cacao en biocarbón mediante torrefacción húmeda, se estableció que la inversión inicial requerida

para la planta fue de aproximadamente 6.94 millones de USD. El precio de venta del biocarbón producido se fijó en 636.34 USD por tonelada. Bajo estas condiciones, se calculó un Valor Actual Neto (VAN) de 4.99 millones de USD y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 20.96 %, con un período de recuperación de inversión estimado en 4.49 años (Jácome, 2022).

Considerando el poder calorífico del biocarbón producido a partir de cáscaras de cacao y su costo de producción, el precio estimado de generación de energía mediante este biocombustible es competitivo en comparación con los combustibles fósiles. Con una inversión inicial bien estructurada y un precio de venta de 636.34 USD/t, la generación de energía a partir de biomasa torrefactada podría alcanzar costos cercanos a 0.0678 USD/kWh, dependiendo de la eficiencia del sistema y la tecnología utilizada (Viñan et al., 2018).

Los costos fijos anuales de operación en una planta de torrefacción incluyen rubros como sueldos (462,692.40 USD), mantenimiento de equipos (88,787.41 USD) y gastos administrativos (115,673.10 USD), sumando un total de 667,152.91 USD. Además, los costos variables, que dependen del volumen de producción, incluyen el consumo de reactivos, electricidad y agua. En este caso, la tarifa eléctrica para el sector industrial se ha establecido en 0.0678 USD/kWh, mientras que el costo del agua industrial es de aproximadamente 2.30 USD/m^3 (Viñan et al., 2018).

8.3 Estudios recientes sobre la torrefacción de biomasa

A continuación, se presentan estudios recientes sobre su aplicación en distintos contextos.

8.3.1 Torrefacción de cáscara de coco para la obtención de biocombustibles en Colombia

La torrefacción de cáscara de coco para la obtención de biocombustibles se ha estudiado a partir de residuos agroindustriales.



Figura 57. Desechos de cáscara de coco.

Fuente: Troudi (2021).

En 2024, la Universidad de Córdoba, Colombia, llevó a cabo un estudio para explorar cómo la torrefacción parcialmente oxidativa puede mejorar las propiedades energéticas de la biomasa, centrándose en la cáscara de coco. Para ello, se realizaron pruebas en un horno de mufla, donde la biomasa fue sometida a temperaturas de 250 °C y 280 °C durante 90 y 120 minutos. Durante el proceso, se aplicaron análisis fisicoquímicos siguiendo normas ASTM y se empleó termogravimetría

(TGA) para evaluar la estabilidad térmica del material. Los resultados mostraron que la torrefacción permitió reducir la humedad y los compuestos volátiles, al mismo tiempo que aumentó la cantidad de carbono fijo y mejoró de manera significativa el poder calorífico del biocombustible obtenido (Yáñez et al., 2024).

El estudio reveló que el poder calorífico superior (HHV), que inicialmente era de 20.68 MJ/kg en la biomasa cruda, alcanzó un valor máximo de 32.85 MJ/kg tras la torrefacción a 280 °C durante 120 minutos. Además, se observó que las muestras tratadas a temperaturas más altas necesitaban menos energía para iniciar su combustión, lo que las hacía más eficientes energéticamente.

Estos hallazgos refuerzan el potencial de la torrefacción parcialmente oxidativa como una solución para transformar residuos agroindustriales en biocombustibles sólidos de alto rendimiento. Sin embargo, el estudio también sugiere que aún hay margen de mejora, especialmente en el diseño del reactor, el manejo de cenizas y la evaluación de la sostenibilidad del proceso en escalas más grandes. En general, esta investigación destaca la importancia de la torrefacción como una herramienta clave en la producción de biocombustibles más eficientes y sostenibles, ayudando a reducir el impacto ambiental y promoviendo un mejor aprovechamiento energético de la biomasa disponible (Yáñez et al., 2024).

8.3.2 Torrefacción húmeda de cáscara de cacao en Ecuador

La torrefacción húmeda se perfila como una solución innovadora dentro de la bioeconomía circular, permitiendo aprovechar de manera más

eficiente los residuos agroindustriales. En Ecuador, un estudio realizado por Cayo Reinoso en la Escuela Politécnica Nacional analizó cómo este proceso puede convertir la cáscara de mazorca de cacao (un subproducto con alto contenido de humedad (85,1 %) y baja densidad energética) en un biocombustible sólido con características mejoradas. Los resultados mostraron que este tratamiento permite aumentar el poder calorífico superior (PCS) hasta 18,2 MJ/kg en base seca, reducir la cantidad de materia volátil y mejorar la estabilidad del material, haciéndolo más fácil de almacenar y transportar (Reinoso, 2018).



Figura 58.Cáscara de cacao.

Fuente: Nateras (2024).

También se observó que la temperatura del proceso influye directamente en la reducción de cenizas y en la capacidad del biocombustible para repeler el agua, lo que optimiza su eficiencia energética. Además, se exploró la posibilidad de reutilizar el agua empleada en el proceso, lo que no solo reduce el consumo de recursos, sino que también contribuye a una producción más sostenible. Aunque

los costos a pequeña escala fueron elevados, la torrefacción húmeda sigue siendo una alternativa viable para transformar residuos agrícolas en biocombustibles sólidos, promoviendo una diversificación energética más limpia y un mejor aprovechamiento de los subproductos generados por la agroindustria (Reinoso, 2018).

8.3.3 Optimización de la torrefacción húmeda con zeolitas en Eslovenia

En un estudio reciente llevado a cabo por Kostyniuk y Likozar (2024) en la Universidad de Ljubljana, Eslovenia, se descubrió que la utilización de diferentes catalizadores de zeolita puede mejorar notablemente el proceso de torrefacción húmeda, logrando una optimización tanto en la calidad del biocombustible sólido como en la generación de productos líquidos valiosos. La Figura 67 muestra micrografías SEM del residuo de celulosa antes y después de la torrefacción húmeda a 220 °C durante 30 minutos. La imagen (a) presenta la estructura fibrosa inicial del WCPR, mientras que (b) evidencia su degradación tras el tratamiento térmico. En (c), la muestra procesada con zeolita Beta exhibe una mayor fragmentación y depósitos superficiales, indicando la influencia del catalizador en la transformación estructural de la biomasa.

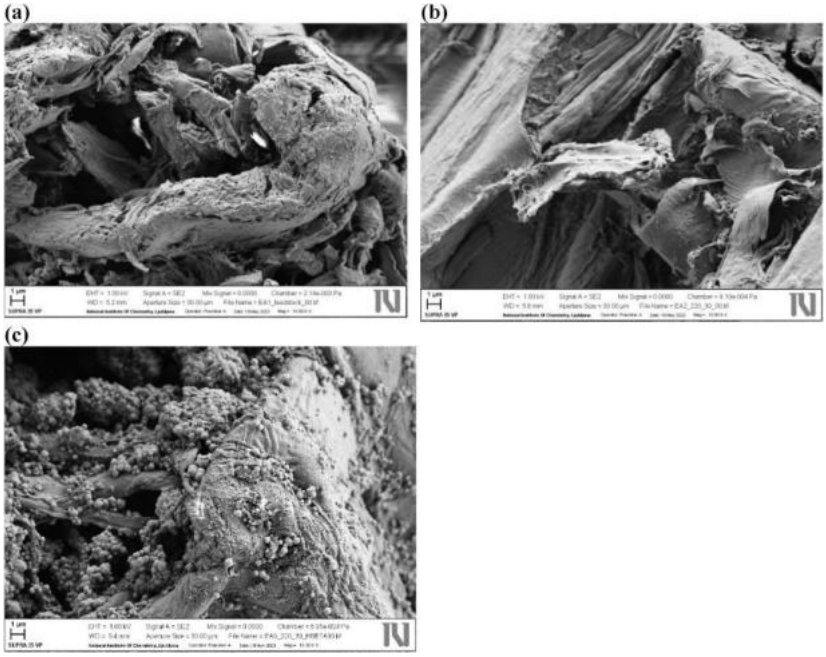


Figura 59. Micrografías SEM de residuos de celulosa.

Fuente: Kostyniuk & Likozar (2024).

En esta investigación, se trabajó con residuos de pulpa de celulosa, utilizando catalizadores como H-ZSM-5, H-Beta, H-Y, H-USY y H-Mordenite en un reactor bajo atmósfera de nitrógeno. Los resultados obtenidos fueron muy positivos: al realizar la torrefacción húmeda a 220 °C durante 60 minutos con el catalizador H-Mordenite, se produjo un hydrochar con un 71,5 % de carbono y un poder calorífico superior (PCS) de 27,3 MJ/kg, lo que aumentó significativamente su calidad como biocombustible (Kostyniuk & Likozar, 2024).

Además, el estudio reveló cómo la elección de los catalizadores influye en la composición de los productos líquidos generados. En particular, utilizando H-USY a 260 °C durante 60 minutos, se obtuvo una cantidad

destacada de etanol (75,6 %), mientras que el ácido levulínico (62,0 %) se generó de manera más eficiente al emplear H-ZSM-5 a 220 °C durante el mismo tiempo. Estos hallazgos subrayan el enorme potencial de la torrefacción húmeda combinada con catálisis heterogénea para convertir residuos lignocelulósicos en biocombustibles sólidos de alta calidad y productos químicos valiosos para la industria (Kostyniuk & Likozar, 2024).

8.4 Aplicaciones industriales y ambientales de la biomasa torrefacta

Además de su uso en la generación de energía, la biomasa sometida a torrefacción puede emplearse en distintos procesos industriales y ambientales. Su estructura modificada la hace adecuada como fuente de azúcares en la fermentación microbiana, como material adsorbente para mejorar la calidad del suelo, como soporte en reacciones biológicas como la digestión anaeróbica y como un agente reductor en procesos de metalurgia (Tripathi et al., 2022).

Investigaciones recientes han explorado la torrefacción como un pretratamiento para mejorar la producción de biohidrógeno a partir de residuos agrícolas como el rastrojo de maíz. En estos estudios, se observó que la cantidad de azúcares reductores y la generación de biohidrógeno aumentaron considerablemente cuando el material fue torrefactado a 200 °C, en comparación con la biomasa sin tratar. Sin embargo, temperaturas superiores a este umbral redujeron la eficiencia del proceso, indicando la necesidad de optimizar las condiciones operativas (Li et al., 2022).

El rendimiento de los azúcares obtenidos tras la hidrólisis de la biomasa torrefacta suele ser inferior al de otros pretratamientos debido a la degradación parcial de la celulosa. Se ha reportado que, a temperaturas cercanas a los 275 °C, la pérdida de celulosa en desechos de madera forestal puede alcanzar el 14 %. Esto se debe a modificaciones en la estructura. cristalina de la biomasa, lo que afecta la interacción con el agua y la eficiencia de transferencia de masa durante la hidrólisis enzimática (Cahyanti et al., 2021).

El interés en el empleo de biomasa torrefacta como material adsorbente ha ido en aumento debido a sus propiedades mejoradas. Investigaciones recientes han demostrado que residuos torrefactados pueden ser más eficientes que el carbón activado en la absorción de hidrocarburos, como se observó en estudios con posos de café usados, donde su capacidad de adsorción fue un 36 % mayor que la del carbón activado. Otras investigaciones han comparado la adsorción de metales pesados y colorantes con materiales torrefactados y pirolizados, concluyendo que la torrefacción favorece la presencia de grupos funcionales ricos en oxígeno y nitrógeno, lo que mejora la eficiencia del proceso (Lee et al., 2022).



Figura 60. Sistema compacto de torrefacción.

Fuente: AVEBIOM (2019).

En el sector metalúrgico, la biomasa torrefacta ha sido evaluada como un sustituto del coque fósil para reducir el impacto ambiental de la industria del acero. Estudios experimentales han demostrado que su mayor contenido de materia volátil mejora la tasa de reducción del óxido de hierro, liberando gases reductores como CO y H_2, lo que puede hacerla más eficiente que el coque tradicional. Además, su estructura porosa favorece la gasificación, reduciendo la temperatura de formación de ciertas fases metálicas. Sin embargo, para su implementación industrial, se requieren estudios adicionales que analicen su viabilidad económica y su impacto en los procesos metalúrgicos a gran escala (Konishi et al., 2010).

CAPÍTULO IX

9. PAPEL DEL REFORMADO Y LAS MICROALGAS DENTRO DE LA BIOECONOMÍA CIRCULAR, AVANCES

La bioeconomía circular es un modelo que busca optimizar el uso de los recursos naturales, reducir la generación de residuos y promover la sostenibilidad a través de soluciones tecnológicas innovadoras. Tres enfoques clave en este modelo son el reformado químico, la torrefacción térmica y el cultivo de microalgas para producir biocombustibles y bioestimulantes agrícolas. Estos métodos no solo mejoran nuestra eficiencia energética, sino que también reducen significativamente las emisiones de carbono al reutilizar desechos industriales. Imaginemos un futuro en el que los residuos agrícolas no se desechan, sino que se convierten en nuevos productos.



Figura 61. Residuos agrícolas.

Fuente: Gestores De Residuos (2021).

La bioeconomía circular nos acerca a ese ideal al fomentar soluciones creativas y sostenibles. Además de proteger el medio ambiente, estos métodos también impulsan economías locales generando empleo verde e innovador. En Ecuador, actualmente se enfrentan desafíos en la gestión de recursos naturales y el camino hacia un modelo de economía circular. Aunque existen limitaciones en inversión y escalabilidad, el país ha mostrado interés en el desarrollo de energías sostenibles y ha realizado investigaciones en este ámbito (Buenaño, 2024).

9.1 Reformado

El reformado químico es un proceso que permite la conversión de compuestos orgánicos (desechos) en gas de síntesis, mediante el empleo de calor y el uso de catalizadores. Además de su uso en la producción de hidrógeno para la industria química y energética, el reformado es clave en tecnologías emergentes como celdas de combustible y procesos de captura y almacenamiento de carbono. El desarrollo de catalizadores más eficientes y métodos híbridos de reformado busca optimizar su eficiencia y reducir su impacto ambiental (Mardani et al., 2025).



Figura 62. Planta de Reformado Catalítico Continuo (CCR) en Argentina.

Fuente: Meditecna (2024).

Dentro de este contexto Sandoval & Siles (2021), analizaron el reformado con vapor de agua (*Steam Methane Reforming*, SMR) y el reformado autotérmico (*Autothermal Reforming*, ATR). Según su investigación, el SMR produce una mayor cantidad de hidrógeno, mientras que el ATR genera un gas de síntesis con una mayor proporción de monóxido de carbono, lo que lo hace más adecuado para la producción de metanol.

Según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA), el costo de producción de hidrógeno mediante reformado de gas natural oscila entre 0,7 y 1,6 USD por kilogramo de hidrógeno. Si se incorpora la captura y almacenamiento de carbono (CCUS) para reducir las emisiones de CO_2 asociadas al proceso, los costos aumentan a un rango de 1,2 a 2,0 USD/kg de hidrógeno.

Es importante destacar que estos valores pueden variar según la región, el acceso a recursos y las condiciones específicas de cada instalación (García, 2020).

9.1.1 Tipos de reformado

9.1.1.1. Reformado con vapor de agua (*Steam Methane Reforming*, SMR)

Este método es el más utilizado en la producción de hidrógeno y gas de síntesis, consiste en la reacción de un hidrocarburo con vapor de agua a altas temperaturas entre 750 a 950 ºC, en presencia de un catalizador que por lo general es de níquel. La reacción básica de este proceso es la siguiente:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2 \qquad \boldsymbol{Ec.23}$$

A pesar de su alta eficiencia, el SMR presenta desafíos, como la emisión de CO_2, lo que ha impulsado la investigación en tecnologías complementarias, como la captura y almacenamiento de carbono (CCS), y en alternativas más sostenibles para la producción de hidrógeno, como la electrólisis del agua. Sin embargo, debido a su madurez tecnológica y menor costo en comparación con otros métodos, el reformado con vapor de agua sigue siendo la principal fuente de hidrógeno a nivel mundial (Moarrefi et al., 2025).

9.1.1.2 Reformado en fase acuosa (APR)

Es un proceso que permite obtener hidrógeno a partir de compuestos como el metanol y otros derivados de biomasa. A diferencia del

reformado con vapor (SR), el APR ocurre en fase líquida, bajo altas presiones (1.5 a 5.1 MPa) y temperaturas moderadas (500 K), lo que facilita la conversión del monóxido de carbono en dióxido de carbono gracias a la reacción de desplazamiento de agua-gas (WGS). (Cartín Muñoz & Ulate Brenes, 2020)

Esto permite producir hidrógeno con un alto grado de pureza. El proceso funciona rompiendo selectivamente ciertos enlaces químicos (C-C) y limitando otros (C-O), favoreciendo la producción de hidrógeno en lugar de hidrocarburos más pesados. Para lograrlo, se utilizan catalizadores metálicos como platino, níquel y rutenio. Aunque el platino es muy eficiente, su alto costo limita su uso a gran escala. En cambio, el níquel es una alternativa más económica, aunque tiene el inconveniente de ser menos estable con el tiempo (Cartín & Ulate, 2020).

9.1.1.3 Reformado autotérmico (*Autothermal Reforming*, ATR)

El Reformado autotérmico (ATR) es un proceso que combina la oxidación parcial con el reformado con vapor de agua, aprovechando un reactor adiabático. Este reactor utiliza el calor generado por la combustión parcial de los hidrocarburos para impulsar las reacciones de reformado, minimizando la necesidad de energía externa. Gracias a este enfoque, el ATR resulta más eficiente en términos energéticos en comparación con otros métodos de reformado que requieren calor adicional. Además, el diseño del proceso permite un control preciso de la temperatura y las condiciones de operación, lo que mejora la

selectividad y la conversión de los reactivos en productos deseados. El Reformado autotérmico (ATR) se basa en tres reacciones principales:

- **Oxidación parcial del combustible** (exotérmica, libera calor)

$$Combustible + O_2 \rightarrow CO + H_2 \qquad (\Delta H < 0) \qquad \boldsymbol{Ec.24}$$

En esta etapa, el combustible reacciona con una cantidad controlada de oxígeno, generando calor y produciendo monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2).

- **Reformado con vapor de agua** (endotérmico, consume calor)

$$Combustible + H_2O \rightarrow CO + H_2 \qquad (\Delta H > 0) \qquad \boldsymbol{Ec.25}$$

El calor generado en la oxidación parcial permite que el combustible reaccione con vapor de agua, lo que incrementa la producción de hidrógeno.

- **Reacción de desplazamiento de agua-gas (**WGS, *Water-Gas Shift***)**

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \qquad \boldsymbol{Ec.26}$$

En esta reacción, el monóxido de carbono generado en las etapas anteriores se convierte en dióxido de carbono (CO_2), produciendo aún más hidrógeno (Cerqueira et al., 2024).

En 2024 se estudió el reformado autotérmico (ATR) en celdas de combustible de óxido sólido a temperatura intermedia (IT-SOFC) utilizando catalizadores de perovskitas a base de lantano. Descubrieron

que el catalizador Ni_LaSrBaTi (perovskita dopada con níquel) logró convertir casi por completo el etanol (99%) y generar una alta cantidad de hidrógeno (83%). Además, demostraron que este material ofrece una gran estabilidad y una notable resistencia a la formación de coque, lo que lo hace muy prometedor para aplicaciones energéticas sostenibles (Dosa et al., 2024).

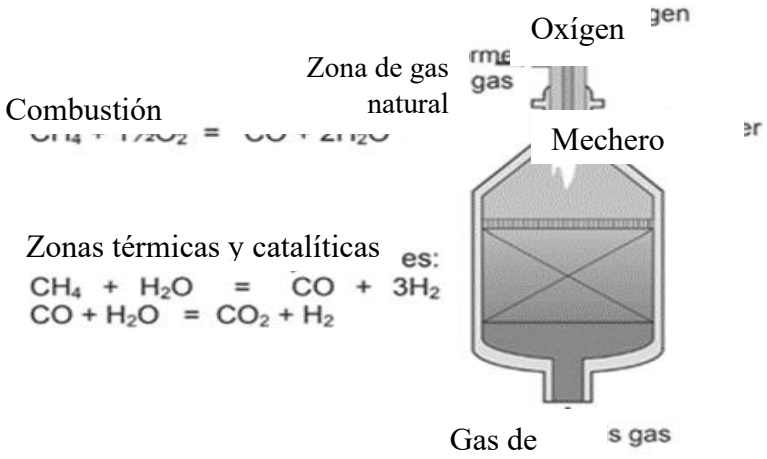


Figura 63. Proceso de reformado autotérmico.

Fuente: Adaptación de Sandoval & Siles (2021).

9.1.2 Reformado de biomasa para hidrógeno verde

El reformado de biomasa residual es una alternativa sostenible para la producción de hidrógeno verde, permitiendo valorar desechos agrícolas e industriales y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Procesos como el reformado en fase acuosa, con vapor. A continuación, se presentan estudios recientes sobre su aplicación en distintos países.

9.1.2.1. Reformado de residuos de poda para hidrógeno verde en España

La valorización de residuos vegetales, como aquellos generados por la poda urbana, ofrece una oportunidad significativa para desarrollar fuentes energéticas sostenibles. Un estudio reciente llevado a cabo por Torres et al. (2024) en la Universidad Autónoma de Madrid ha explorado una alternativa innovadora para producir hidrógeno a partir de estos desechos mediante un proceso que combina tratamiento hidrotérmico y reformado en fase acuosa (APR).



Figura 64. Residuos de poda urbana.

Fuente: EcoObjetivo (2023).

El procedimiento se divide en dos etapas principales. Primero, los residuos vegetales se someten a un tratamiento hidrotérmico que utiliza agua y calor para convertirlos en una solución rica en compuestos orgánicos solubles. Este proceso de tratamiento hidrotérmico no solo facilita la descomposición de la biomasa, sino que también mejora la

solubilidad de los componentes orgánicos, permitiendo una extracción más eficiente de compuestos de valor. Luego, esta solución es procesada mediante reformado en fase acuosa utilizando un catalizador específico basado en platino soportado sobre carbono, lo cual facilita la liberación eficiente del hidrógeno. Este tipo de reformado, que ocurre en presencia de agua, aprovecha las condiciones acuosas para promover reacciones de descomposición y conversión de los compuestos solubles en productos de valor, como el hidrógeno, con una alta selectividad y eficiencia. El estudio reportó una producción notable de 17 mmol de hidrógeno por gramo de carbono orgánico disuelto, lo que demuestra la alta efectividad del proceso en términos de rendimiento energético. Estos resultados subrayan el potencial del método APR como una herramienta efectiva para convertir biomasa lignocelulósica en recursos energéticos renovables, proporcionando una alternativa viable y eficiente para la producción de hidrógeno a partir de fuentes no fósiles. La utilización del reformado en fase acuosa promueve modelos energéticos más sostenibles, alineados con los principios de la bioeconomía circular, donde se busca maximizar el aprovechamiento de los recursos naturales y minimizar los residuos, contribuyendo así a la transición hacia sistemas energéticos más verdes y responsables (Torres et al., 2024).

9.1.2.2. Reformado en fase acuosa del rastrojo de piña en Costa Rica

El rastrojo de piña, un residuo agrícola abundante, puede aprovecharse para producir hidrógeno mediante reformado en fase acuosa (APR). En

este proceso, los azúcares presentes en la biomasa reaccionan con agua y un catalizador metálico, generando un gas rico en hidrógeno.



Figura 65. Rastrojo de piña.

Fuente: Rica (2018).

El proceso global de reformado en fase acuosa del rastrojo de piña puede representarse mediante la siguiente ecuación 26:

$$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 12H_2 \qquad \boldsymbol{Ec.27}$$

Un estudio realizado por Brenes & Jaikel (2021) analizó el uso de níquel sobre alúmina como catalizador en este proceso. Durante la reacción, que se llevó a cabo a 200°C por 2 horas, se observó que la cantidad de níquel influye directamente en la producción de hidrógeno. Con 5% de níquel, la generación fue de 110 mmol/gcat·h, aumentando a 149 mmol/gcat·h con 20% y alcanzando un máximo de 221 mmol/gcat·h con 35% de níquel. Estos resultados indican que, a mayor contenido de níquel, más eficiente es la conversión del rastrojo en

hidrógeno, lo que lo convierte en una alternativa prometedora para el aprovechamiento de residuos agrícolas.

9.1.2.3. Reformado de glicerol para hidrógeno verde en Ecuador

En 2023 la Universidad de Loja desarrolló una investigación para la utilización de glicerol un residuo de la producción de biodiesel para la obtención de hidrógeno verde por medio del reformado de vapor. Este tipo de reformado es un proceso similar al SMR, en el que el glicerol ($C_3H_8O_3$) reacciona con vapor de agua a altas temperaturas, generando hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2) como productos principales. La reacción química se representa de la siguiente manera:

$$C_3H_8O_3 + 3H_2O \rightarrow 3CO_2 + 7H_2 \qquad \boldsymbol{Ec.28}$$

Los investigadores demostraron que bajo condiciones de operación los resultados obtenidos en este estudio muestran que, bajo condiciones óptimas de operación, se logró un rendimiento de hidrógeno del 85%, lo que indica una alta eficiencia del proceso. Este método de obtención de hidrógeno verde no solo ayuda a mitigar los desperdicios de esta industria, sino que permite obtener un combustible limpio como diversas aplicaciones a nivel. Dentro de este estudio se demostró que el uso de catalizadores de Níquel ayuda a optimizar el proceso de reformado con vapor (Armando & Castañeda, 2022).

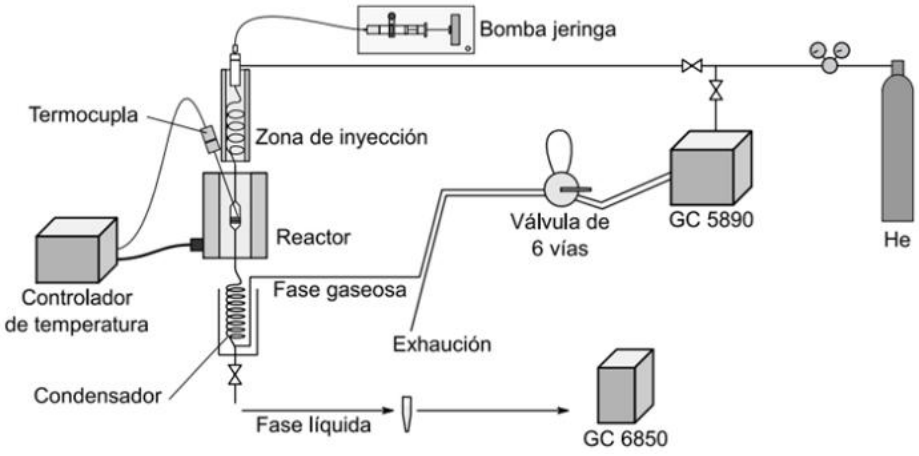


Figura 66. Esquema del equipo de reacción para reformado de glicerol con vapor de agua.

Fuente: Armando & Castañeda (2022).

9.1.2.4. Reformado de biomasa para hidrógeno en Argentina

El uso de residuos biomásicos como materia prima para la producción de biocombustibles gaseosos ha cobrado gran relevancia en el avance hacia una bioeconomía sostenible. Un estudio realizado en Argentina en 2023 por García Peña, Córdoba Arroyo, Busto y Badano explora la conversión de biomasa en un gas de síntesis con alto contenido de hidrógeno mediante gasificación y reformado catalítico (García, 2023).

La investigación resalta la importancia de optimizar estos procesos a través del uso de catalizadores, los cuales desempeñan un papel crucial en la eficiencia y estabilidad del sistema. Se enfatiza, además, la necesidad de emplear materiales con alta resistencia térmica para evitar su degradación y mejorar el rendimiento del proceso (García, 2023).

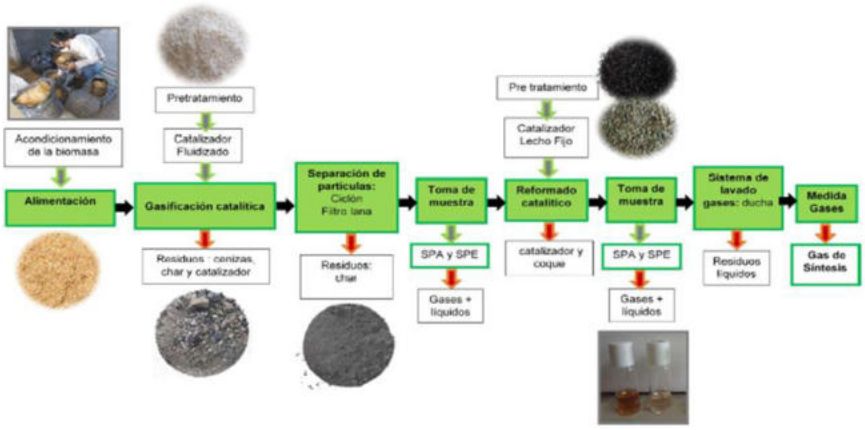


Figura 67. Proceso de gasificación y reformado catalítico de biomasa.

Fuente: García (2023).

Los hallazgos del estudio evidencian que la combinación de gasificación y reformado catalítico permite no solo aprovechar mejor la energía contenida en la biomasa, sino también reducir las emisiones contaminantes. En países como Ecuador, donde la actividad agroindustrial genera grandes volúmenes de residuos biomásicos, esta tecnología podría representar una solución viable para la producción de energía renovable. Además, se destaca la relevancia de incorporar estos procesos en plantas de bioenergía, lo que contribuiría a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y a la consolidación de un modelo de bioeconomía circular (García, 2023).

9.2 Compuestos orgánicos volátiles (VOCs)

Los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) son sustancias químicas que se evaporan con facilidad a temperatura ambiente y desempeñan un papel esencial en los procesos termoquímicos involucrados en la

conversión de biomasa. Durante la combustión y pirólisis de materiales lignocelulósicos, como la madera y los residuos agrícolas, se generan estos compuestos debido a la degradación térmica de la celulosa, hemicelulosa y lignina (Desservettaz et al., 2023). Su composición es muy variada e incluye hidrocarburos, compuestos oxigenados, aromáticos y heterocíclicos, lo que influye en sus propiedades y aplicaciones en distintos sectores industriales y científicos (Rebryk et al., 2024).

Desde la perspectiva de la bioeconomía circular, los VOCs pueden ser tanto un desafío ambiental como una oportunidad para la valorización de subproductos. En sistemas bien diseñados, su captura y aprovechamiento permite transformarlos en insumos para la producción de biocombustibles y solventes ecológicos. Sin embargo, si no se gestionan de manera eficiente, su liberación descontrolada puede contribuir a la contaminación atmosférica y a la formación de ozono troposférico, con efectos negativos en la calidad del aire y el medio ambiente (Rico et al., 2023).

La implementación de estufas de gasificación y materiales porosos en procesos térmicos contribuye a la reducción de emisiones de VOCs al optimizar la combustión, minimizando así su impacto ambiental y fomentando un uso más sostenible de los recursos (Rebryk et al., 2024). Asimismo, el empleo de biosorbentes obtenidos de residuos agroindustriales, como cáscaras de frutas, bagazo de caña, aserrín y cáscaras de huevo, representa una estrategia innovadora y sostenible para la captura de estos compuestos. Mediante procesos como la pirólisis y la activación con CO_2, se mejora la porosidad de estos

materiales, aumentando su capacidad de adsorción. Además, tratamientos químicos con ácidos y bases pueden potenciar su eficiencia en la retención de contaminantes polares y apolares. Estas soluciones han demostrado ser efectivas y más ecológicas en comparación con el uso de carbón activado, especialmente para la eliminación de hidrocarburos aromáticos y compuestos oxigenados (Makoś et al., 2024).

Por otro lado, los incendios de biomasa liberan una gran cantidad de VOCs, entre ellos metanol, acetaldehído y compuestos aromáticos como el benceno y el tolueno. Estos contaminantes afectan la calidad del aire y favorecen la formación de ozono en la atmósfera baja, representando un riesgo para la salud humana. La composición y cantidad de VOCs emitidos varía en función de la química de la vegetación y las condiciones atmosféricas durante la combustión, lo que resalta la importancia de estrategias de manejo forestal sostenible dentro del enfoque de bioeconomía circular (Álvaro et al., 2024).

En el ámbito biológico, plantas y microorganismos también generan compuestos orgánicos volátiles biogénicos (BVOCs), los cuales tienen un rol clave en la atmósfera. En particular, las plantas aromáticas emiten BVOCs con propiedades antimicrobianas que pueden modificar la composición de los bioaerosoles en entornos agrícolas. Esto sugiere su potencial en estrategias de control biológico, ayudando a reducir la presencia de patógenos en el aire y promoviendo prácticas de agricultura sostenible (Yadav & Khare, 2025).

9.3 Microalgas

Las microalgas son diminutos seres vivos que aprovechan la luz del sol para crecer y generar biomasa de forma eficiente. En el proceso, absorben dióxido de carbono, lo que las convierte en aliadas naturales en la lucha contra el cambio climático. Su increíble versatilidad las ha posicionado como una alternativa sostenible en la bioeconomía circular, encontrando aplicaciones en múltiples industrias. Desde la producción de biocombustibles y fertilizantes naturales hasta su incorporación en alimentos y productos farmacéuticos, estas microalgas ofrecen soluciones innovadoras que benefician tanto a las personas como al planeta. Las microalgas son organismos increíblemente adaptables que pueden cultivarse en diferentes entornos, ya sea en sistemas abiertos expuestos al ambiente o en instalaciones cerradas y controladas. Esta flexibilidad, sumada a su capacidad para crecer utilizando aguas residuales y absorber el CO_2 de procesos industriales, las convierte en una alternativa ecológica con un gran impacto positivo en el planeta. Sin embargo, producirlas a gran escala no es tarea fácil, ya que su viabilidad económica depende de múltiples factores, como el método de cultivo, el costo de los insumos, la tecnología empleada y la eficiencia en su recolección. A pesar de estos retos, la ciencia y la innovación han demostrado que, al mejorar estos procesos, se pueden reducir costos y hacer que su producción sea más rentable y sostenible, permitiendo que su enorme potencial beneficie a más sectores y personas. En el ámbito agrícola, las microalgas han sido utilizadas como bioestimulantes debido a su contenido en proteínas, ácidos grasos poliinsaturados y antioxidantes, los cuales favorecen el crecimiento de los cultivos y mejoran la absorción de nutrientes.



Figura 68. cultivo de microalgas en un laboratorio.

Fuente: Agrotendencia (2020).

9.3.1 Importancia de los fotobiorreactores en la producción de microalgas

Dentro de la producción de microalgas, los fotobiorreactores son dispositivos fundamentales, ya que permiten cultivarlas en un entorno controlado donde se pueden ajustar factores como la luz, la temperatura, el pH y los nutrientes. Gracias a esta regulación precisa, es posible optimizar la producción de biomasa y aprovechar su potencial en distintas industrias. Estos sistemas se utilizan para la generación de biocombustibles, la captura de dióxido de carbono y la obtención de compuestos valiosos para la biotecnología, la industria farmacéutica y la producción de biofertilizantes, impulsando así soluciones más sostenibles y eficientes. Dentro de la producción de microalgas, se pueden utilizar dos tipos de fotobiorreactores: abiertos y cerrados.

9.3.1.1. Fotobiorreactores abiertos (Tipo *Raceway*)

Los fotobiorreactores abiertos, también llamados *raceways*, son una de las alternativas más utilizadas para el cultivo de microalgas, principalmente porque su construcción es económica y su expansión es sencilla. Estos sistemas consisten en estanques poco profundos diseñados para aprovechar al máximo la luz solar, favoreciendo así el crecimiento de los microorganismos fotosintéticos (Guzmán et al., 2021).



Figura 69. Fotobiorreactor Abierto (Tipo Raceway).

Fuente: Conecta (2023).

Su diseño se basa en un canal con forma de U, donde el agua con microalgas se mantiene en constante circulación gracias a paletas mecánicas que aseguran un flujo uniforme. Además, incorporan un compartimento subterráneo en el que se inyecta dióxido de carbono (CO_2), un nutriente clave para el desarrollo de las microalgas. Gracias a su eficiencia y bajo consumo de energía, estos sistemas son ideales

para la producción a gran escala y se emplean en la obtención de biocombustibles y el tratamiento de aguas residuales. No obstante, al estar al aire libre, son más propensos a la contaminación, lo que puede comprometer la calidad del cultivo (Guzmán et al., 2021).

9.3.1.2. Fotobiorreactores cerrados (Tubulares)

A diferencia de los sistemas abiertos, los fotobiorreactores cerrados proporcionan un entorno más controlado para el cultivo de microalgas, ya que están completamente aislados del exterior. Esto permite regular con precisión factores como la luz, la temperatura y la aireación, minimizando el riesgo de contaminación y asegurando una biomasa de alta calidad (Guzmán et al., 2021).



Figura 70. Fotobiorreactor Cerrado (Tubulares).

Fuente: Liaoning Koen Machinery Co., Ltd. (2019).

Estos sistemas están formados por una serie de tubos transparentes por los que circula el cultivo, lo que garantiza una exposición uniforme a la

luz solar y favorece el proceso de fotosíntesis. Además, cuentan con una columna de burbujeo que mantiene un flujo constante de aire y ayuda a estabilizar la temperatura, creando condiciones óptimas para el crecimiento de las microalgas. Gracias a este diseño, los fotobiorreactores cerrados son ideales para la producción de biomasa altamente pura, utilizada en industrias como la farmacéutica, cosmética y alimentaria. No obstante, su principal desventaja es el alto costo de instalación y mantenimiento. Además, su expansión a gran escala puede resultar más compleja en comparación con los sistemas abiertos, lo que representa un desafío en su aplicación a proyectos de mayor escala (Guzmán et al., 2021).

9.3.2 El papel de la inteligencia artificial en el biodiésel de microalgas

La inteligencia artificial (IA) está revolucionando la producción de biodiésel a partir de microalgas, haciéndola más eficiente y sustentable. Su uso permite mejorar el cultivo de microalgas, elegir las especies más productivas y optimizar la extracción de aceites para transformarlos en biocombustibles. Mediante algoritmos avanzados, la IA analiza información en tiempo real y ajusta factores como la temperatura, la luz y los nutrientes para aumentar la producción. También ayuda a identificar las cepas con mayor contenido lipídico y optimiza los métodos de extracción y conversión, reduciendo costos y minimizando el impacto ambiental (Chhandama et al., 2023). En definitiva, integrar la IA en este proceso no solo lo hace más rentable, sino que también fortalece su viabilidad como alternativa a los combustibles fósiles, impulsando un futuro energético más limpio y sostenible.

9.3.3 Microalgas una alternativa para bioestimulantes agrícolas

Las microalgas representan una alternativa prometedora para la producción de bioestimulantes agrícolas debido a su riqueza en metabolitos bioactivos como aminoácidos, fitohormonas, polisacáridos, proteínas y lípidos. Estos compuestos pueden mejorar el crecimiento de las plantas al estimular procesos fisiológicos clave, como la división celular, la elongación radicular y la síntesis de clorofila. Además, los bioestimulantes derivados de microalgas aumentan la tolerancia de los cultivos a condiciones adversas como la sequía, la salinidad y el estrés térmico, gracias a la presencia de antioxidantes y osmoprotectores naturales. También optimizan la absorción y asimilación de nutrientes esenciales, mejorando la eficiencia del uso de fertilizantes y reduciendo su impacto ambiental. Su aplicación en la agricultura, ya sea mediante tratamientos foliares, fertilización líquida o como mejoradores del suelo, no solo impulsa el rendimiento de los cultivos, sino que también contribuye a la regeneración microbiológica del suelo y fomenta prácticas agrícolas más sostenibles dentro del modelo de bioeconomía circular (Mera, 2019).

9.3.4 Microalgas una alternativa sostenible para la producción de biocombustibles

Las microalgas han emergido como una alternativa viable para la producción de biocombustibles debido a su alta tasa de crecimiento, su eficiencia en la captura de CO_2 y su capacidad para almacenar lípidos que representan entre un 10 % y un 50 % de su biomasa, ideales para la producción de biodiésel mediante transesterificación. Especies como

Botryococcus braunii, Chlorella vulgaris y *Nannochloropsis sp.* son especialmente eficientes en la acumulación de aceites, lo que las convierte en opciones atractivas para biocombustibles renovables (Escobedo & Calderón, 2021).

Además, las microalgas pueden producir bioetanol y biogás debido a su contenido en carbohidratos, que varía entre un 10 % y un 50 % de su biomasa. Compuestos como el almidón y otros polisacáridos pueden ser convertidos en bioetanol a través de procesos de hidrólisis y fermentación (Pérez et al., 2024). A diferencia de cultivos tradicionales como el maíz o la caña de azúcar, las microalgas ofrecen una alternativa más sostenible, ya que su producción no requiere grandes extensiones de tierra cultivable ni un alto consumo de agua dulce. Su cultivo en aguas residuales, salinas o industriales reduce la competencia con la agricultura y minimiza el impacto ambiental. La optimización de cepas, el desarrollo de métodos de extracción más eficientes y su integración en biorrefinerías pueden hacer de las microalgas una fuente clave de energía renovable dentro del modelo de bioeconomía circular.

9.3.5 Estudios recientes sobre microalgas para biocombustibles y bioestimulantes

A continuación, se presentan estudios recientes sobre el uso de microalgas en la obtención de biocombustibles y bioestimulantes en distintos sectores.

9.3.5.1. Producción de biocombustible a partir de microalgas en Ecuador

Las microalgas destacan en la producción de biocombustibles por su capacidad de generar lípidos energéticos, su rápido crecimiento y su alta eficiencia en la captura de CO_2. Además, pueden cultivarse sin competir con la agricultura, lo que las convierte en una alternativa sostenible a los combustibles fósiles. En esta línea, un estudio realizado por Encalada Rosales (2021) exploró el potencial de *Desmodesmus communis*, una microalga obtenida de la Reserva Biológica Limoncocha en Ecuador, como fuente de biomasa para la producción de biocombustibles.



Figura 71. Reserva Biológica Limoncocha en Ecuador.

Fuente: Quintero (2021).

Los resultados revelaron que *D. communis* alcanzó una concentración final de biomasa de 2,4 g/L después de diez días de cultivo en medio BG11. Para evaluar su viabilidad en la producción de biodiésel, se

analizaron sus niveles de lípidos, logrando una extracción del 19.7% de lípidos y un 63.46% de ácidos grasos libres utilizando cloroformo: metanol (1:2) como solvente.

Aunque estos valores aún no alcanzan el umbral ideal para una conversión eficiente en biocombustibles, el estudio sugiere que, con ajustes en las condiciones de cultivo, como un mayor suministro de CO_2 o la optimización de los nutrientes, se podría mejorar la productividad lipídica. Este estudio resalta la importancia de investigar microalgas autóctonas de Ecuador como una alternativa viable y sostenible para la generación de biocombustibles. Su cultivo y aprovechamiento no solo podría impulsar el desarrollo de energías renovables en el país, sino que también contribuiría a la transición hacia una bioeconomía circular más eficiente y respetuosa con el medio ambiente (Rosales, 2021).

9.3.5.2. Bioestimulantes de microalgas en cultivos hidropónicos en Ecuador

Un estudio realizado en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra analizó el impacto de *Scenedesmus sp.* como bioestimulante en cultivos hidropónicos de lechuga (*Lactuca sativa*). Los resultados mostraron que su uso mejora el crecimiento de las plantas, optimiza la absorción de nutrientes y promueve una mayor eficiencia en el uso del agua, sin la necesidad de recurrir a fertilizantes químicos.



Figura 72. Invernadero de la granja experimental PUCE-SI.

Fuente: Mera (2019).

A diferencia de los fertilizantes convencionales, los bioestimulantes a base de microalgas no solo mejoran la nutrición vegetal, sino que también fortalecen los mecanismos naturales de defensa de las plantas y favorecen un aprovechamiento más eficiente de los recursos disponibles en el suelo o en sistemas hidropónicos. Gracias a estos beneficios, su uso está ganando relevancia en la agricultura sostenible, ofreciendo una alternativa viable para reducir la dependencia de insumos químicos (Mera, 2019).

9.3.5.3. Efecto de microalgas en el crecimiento del tomate en Hungría

En este contexto un estudio realizado por Margaret Mukami Gitau, Attila Farkas, Vince Ördög y Gergely Maróti analizó cómo dos microalgas de la familia Chlorophyta, Chlamydomonas reinhardtii cc 124 y Chlorella sp. MACC-360, influyen en el crecimiento y desarrollo del tomate (Solanum lycopersicum). Para ello, los investigadores

aplicaron tanto células vivas como extractos de estas microalgas en el suelo y en las hojas de las plantas, evaluando su impacto en distintos aspectos del cultivo (Gitau et al., 2022).

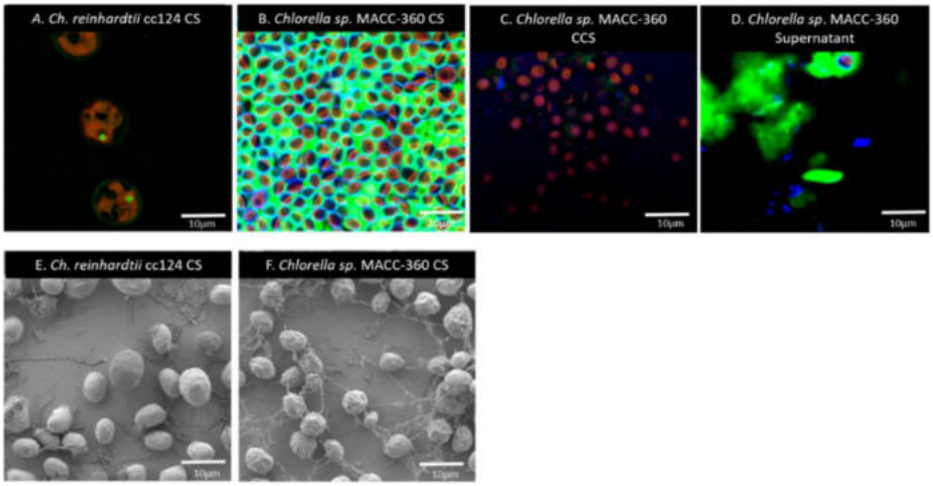


Figura 73. Microscopía de Chlamydomonas reinhardtii cc124 y Chlorella sp. MACC-360 bajo diferentes Condiciones.

Fuente: Gitau et al., (2022).

La Figura 73 muestra imágenes de microscopía de *Chlamydomonas reinhardtii* cc124 y *Chlorella sp.* MACC-360 analizadas bajo distintas condiciones experimentales. En las micrografías de fluorescencia (A-D), se observan variaciones en la estructura celular y la distribución de compuestos fluorescentes. La imagen (A) presenta a *C. reinhardtii* cc124 en su condición control (CS), donde sus células aparecen como esferas bien definidas con una fluorescencia uniforme. En (B), *Chlorella sp.* MACC-360 en CS muestra una disposición celular compacta y homogénea. Por otro lado, en (C), *Chlorella sp.* MACC-360 bajo la condición CCS revela un patrón distinto de fluorescencia,

mientras que en (D) se identifican estructuras fluorescentes dispersas en el supernatante, lo que sugiere posibles interacciones con el medio. Finalmente, las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica (E-F) permiten apreciar con mayor detalle la superficie celular de *C. reinhardtii* cc124 y *Chlorella sp.* MACC-360 en CS, resaltando sus diferencias morfológicas y el grado de agregación celular en cada caso (Gitau et al., 2022).

Los resultados fueron bastante interesantes, ya que ambas microalgas ayudaron a mejorar la calidad del tomate, favoreciendo un mayor contenido de pigmentos, así como frutos más grandes y pesados. Sin embargo, cada una actuó de manera diferente: *Chlorella sp*. MACC-360 aceleró la floración y fructificación, optimizando el uso de la luz y contribuyendo al engrosamiento de las hojas, lo que sugiere un efecto estimulante en el desarrollo del cultivo (Gitau et al., 2022).

Por otro lado, *Chlamydomonas reinhardtii* cc 124 mostró un enfoque más defensivo, retrasando la floración, pero fortaleciendo la fotosíntesis, lo que podría ayudar a la planta a resistir mejores condiciones adversas. Estos hallazgos destacan el potencial de ambas microalgas como bioestimulantes naturales en la agricultura sostenible. Dependiendo de las necesidades del cultivo, podrían utilizarse para potenciar el crecimiento, mejorar la calidad del fruto o incluso fortalecer la resistencia de las plantas, ofreciendo una alternativa ecológica a los fertilizantes convencionales (Gitau et al., 2022).

9.3.5.4. Microalgas como bioestimulantes en el cultivo de maíz en Italia

Otro estudio realizado por Martini et al. (2021) exploró el uso de las microalgas *Chlamydomonas reinhardtii* y *Chlorella sorokiniana* como bioestimulantes en el cultivo de maíz, centrándose en su impacto sobre el crecimiento de las raíces y la absorción de nutrientes. Los hallazgos revelaron que *C. sorokiniana* favoreció el desarrollo de raíces secundarias, mientras que *C. reinhardtii* mejoró la acumulación de micronutrientes en la planta.

Asimismo, cuando las plantas fueron sometidas a estrés por falta de nitrógeno, aquellas tratadas con *C. sorokiniana* desarrollaron un sistema radicular más fuerte en comparación con las que no recibieron tratamiento. Esto sugiere que los bioestimulantes derivados de microalgas pueden fortalecer los cultivos y hacerlos más resistentes a condiciones adversas. El mecanismo detrás de estos efectos se basa en la mejora de la asimilación del nitrógeno en la planta, facilitada por reacciones bioquímicas como la conversión de nitrato en amonio:

$$NO_3^- + H_2O + ATP \rightarrow NH_4^+ + ADP + Pi + O_2 \qquad \textbf{Ec. 29}$$

La investigación, destaca el potencial de estas soluciones naturales como una alternativa sostenible para optimizar la producción agrícola, especialmente en suelos con deficiencias nutricionales (Martini et al., 2021).

9.4 Revistas científicas y avances en la bioeconomía circular

El ser humano necesita de un impulso para generar interés y por ende avances en los distintos campos de las ciencias, cuando nos enfocamos en una ciencia en crecimiento como lo es la biotecnología principalmente se requieren investigaciones, análisis de laboratorio y conclusiones que nos permitan incentivar aún más al crecimiento del conocimiento biotecnológico, pues una revista de biotecnología puede funcionar como un centro de acogida para distintos estudios, demostrando un resultados y entregando nuevas variables de interés, con las cuales llevar a cabo mejoras en los sistemas de producción, seguridad y eficiencia, que apunten a obtener mejoras generales para la vida y sostenibilidad humana, incentivando a sí mismo al mejoramiento de políticas con respecto a la eliminación y tratamiento de residuos, como ya se está demostrando en nuestra actualidad a partir del aprovechamiento de biomasa para obtención de combustibles eco amigables, regulación de la eliminación de desechos a fuentes hídricas, limitaciones a la forma de eliminación de desechos, establecimiento de plantas purificadoras de agua.

Claro está que, los avances tecnológicos apoyan directamente a la bioeconomía circular, pues varios de estos conocimientos infieren sobre procesos de tratamientos a los desechos, agregando valor a los residuos humanos y creando un sistema de economía circular, donde aquella materia ya utilizada, sobrante o en descomposición es capaz de volver a nosotros transformada.

Podemos tomar como ejemplos de revistas científicas que se acercan a temas de desarrollo para la economía circular a las siguientes:

9.4.1 Journal of Cleaner Production

Revista de carácter internacional en la que se comparten estudios acerca de mejoramiento de procesos productivos para una producción limpia, mejoras medioambientales y estudios acerca de la sostenibilidad, que nos acercan cada vez más a un sistema de economía circular. Podemos en 2025 encontrar artículos de revisión sobre modelos de negocio, revisiones de procesos de remediación, entre otros temas.

9.4.2 Resources, Conservation and Recycling

Es una revista en la que se aceptan artículos que traten acerca de residuos, el tratamiento de estos para reducir su impacto y la sostenibilidad de los recursos naturales, temas que son primordiales para generar una movilización al tipo de economía que este libro trata. Podemos encontrar artículos que estudian el efecto del reciclaje de pavimentos en las emisiones de carbono y estudios acerca de las limitaciones del manejo de residuos de la economía circular.

9.4.3 Next Sustainability

Es una revista que forma parte de la familia “Next”, es la encargada de publicar todo lo relacionado a la sostenibilidad como lo pueden ser estudios que miden la aplicabilidad de procesos de fermentación para la reutilización o reciclado de material orgánico de desecho.

9.4.4 Journal of Industrial Ecology

Publica artículos de investigación acerca de sostenibilidad y economía circular considerando las relaciones entre el medio ambiente y los sistemas socio económicos, priorizando el entendimiento de los sistemas de impacto medioambiental.

CONCLUSIONES

Pensar en bioeconomía circular es más que hablar de residuos o eficiencia. Es imaginar una forma distinta de habitar el planeta, de vincularnos con la tierra, con nuestros alimentos, con los saberes de nuestras comunidades y con los ciclos naturales que nos sostienen. A lo largo de este libro, hemos recorrido muchas aristas de este enfoque: desde los marcos teóricos y normativos hasta las experiencias concretas que ya están floreciendo en diferentes territorios de América Latina.

Lo que nos queda claro después de este recorrido es que la bioeconomía circular no es una receta única ni una solución mágica. Es una apuesta compleja, pero profundamente necesaria, que exige diálogo entre disciplinas, entre actores, entre generaciones. Requiere articular lo técnico con lo social, lo económico con lo ecológico, y sobre todo, exige reconocer que los territorios no son solo espacios productivos, sino comunidades vivas, con historia, cultura y conocimiento.

Las experiencias compartidas en estas páginas muestran que la transformación es posible. Que hay personas, grupos, instituciones y emprendimientos que ya están haciendo las cosas de manera distinta, recuperando saberes, cerrando ciclos, innovando con respeto al entorno y generando valor sin destruir. Pero también nos dejan ver los desafíos: la falta de políticas adecuadas, la desconexión entre ciencia y territorio, las barreras estructurales que aún impiden escalar muchas de estas iniciativas.

Por eso, más allá del diagnóstico, este libro quiere ser también una invitación. Una invitación a seguir aprendiendo, a ensuciarse las manos

en el campo, a sentarse a conversar con productores, con comunidades, con jóvenes, con científicos. A salir del escritorio y volver la mirada a lo esencial. Porque no se trata solo de cambiar tecnologías, sino de cambiar lógicas, de recuperar la confianza en la colaboración, en la diversidad y en las soluciones que nacen desde abajo.

En definitiva, construir una bioeconomía circular es un acto colectivo. No se logra de forma aislada, ni desde un solo sector. Se construye con alianzas, con voluntad política, con educación transformadora y con compromiso ciudadano. Si algo hemos aprendido en este camino, es que la circularidad no es solo una cuestión de flujos de materia o energía. Es, ante todo, una nueva forma de pensar el desarrollo: más justa, más regenerativa y profundamente humana.

GLOSARIO

AEL: Electrólisis alcalina *(Alkaline electrolysis).*

APR: Reformado en Fase Acuosa.

APS: Escenario de los compromisos anunciados *(Announced pledges scenario).*

ATP: Adenosín trifosfato (molécula energética en procesos biológicos).

ATR: Reformado autotérmico *(Autothermal Reforming).*

BFW: Agua de alimentación de caldera *(Boiler feed water).*

BG11: Medio de cultivo estándar para microalgas.

BVOCs: Compuestos orgánicos volátiles biogénicos.

CCD: Diseño compuesto central, método estadístico para optimización de procesos (*Central composite design*).

CCR: Reformado catalítico continuo.

CCS y CAC: Captura y almacenamiento de carbono *(Carbon capture and storage).*

CCUS: Captura, utilización y almacenamiento de carbono.

CW: Agua de refrigeración *(Cooling water)*

CPI: Industrias de procesos químicos.

CPL: Lodos de compostaje.

CSF: Fertilizante sintético comercial.

DP: Caída de presión, en sistemas de recuperación de calor (*Differential pressure*).

ETBE: Etil-ter-butil-éter (aditivo para gasolina derivado del bioetanol).

FAEE: Ésteres etílicos de ácidos grasos (Fatty Acid Ethyl Esters).

FBN: Fijación biológica de nitrógeno.

FFV: Vehículos flex-fuel (*Flexible fuel vehicles*).

FID: Detector de ionización de llama, utilizado en cromatografía de gases (*Flame ionization detector*).

GEI: Gases de efecto invernadero.

GJ: Gigajulio.

HHV: Valor calorífico superior (*Higher heating value*).

IEA: Agencia internacional de energía (*International energy agency*).

IRENA: Agencia internacional de energías renovables *(International renewable energy agency).*

IPL: Lodos de incineración.

IT-SOFC: Celdas de combustible de óxido sólido a temperatura intermedia.

kWh: Kilovatio-hora

LL: Lixiviados de vertederos.

Mg/ha: Megagramos por hectárea.

MIT-L51: Cepa específica de *Saccharomyces cerevisiae* utilizada en fermentación.

MJ: Megajulio (unidad de energía).

MJ/kg: Megajulios por kilogramo (unidad de energía específica utilizada para medir el poder calorífico de combustibles).

MPa: Megapascal.

Mt: Millones de toneladas.

NREL: Laboratorio nacional de energías renovables *(National renewable energy laboratory)*.

PBR: Reactor de lecho empacado (*Packed bed reactor*).

PCI: Poder calorífico interior.

PCS: Poder calorífico superior.

PEM: Electrólisis de electrolito de membrana de polímero *(Polymer electrolyte membrane electrolysis)*.

PHA: Polihidroxialcanoatos (Biopolímeros biodegradables).

PLA: Ácido poliláctico (Biopolímero).

PNIEC: Plan nacional integrado de energía y clima.

POX: Oxidación parcial *(Partial Oxidation).*

ppm: Partes por millón (Unidad de concentración).

PSA: Adsorción por oscilación de presión.

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales.

PVA: Alcohol polivinílico, material utilizado en inmovilización de enzimas (Polyvinyl Alcohol).

SAF: Combustibles sostenibles de aviación (*Sustainable Aviation Fuels*).

SBA-15: Santa Bárbara Amorphous-15 (Material mesoporoso utilizado en catálisis y adsorción).

SEM: Microscopía electrónica de barrido.

SMR: Reformado con vapor de agua *(Steam methane reforming)*.

SOEL: Electrólisis de sólido óxido *(Solid oxide electrolysis).*

SSF: Sacarificación y fermentación simultánea.

STEPS: Escenario de políticas declaradas *(Stated Policies Scenario).*

TAR: Reformado de residuo líquido.

TIR: Tasa Interna de retorno.

U/mL: Unidades de actividad enzimática por mililitro.

USD: Dólares estadounidenses.

VAN: Valor actual neto.

VOCs: Compuestos orgánicos volátiles.

v/v: Volumen sobre volumen (Expresión de concentración).

WCPR: Residuo de pulpa de celulosa de desperdicios.

WGS: Reacción de desplazamiento de agua-gas *(Water gas shift).*

XPS: Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2019). Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución - Servicio público de energía eléctrica. Periodo: Enero-Diciembre 2020. Resolución N.º ARCONEL – 035/19.

Agrotendencia. (2020). Microalgas: alternativa sustentable que crece y se consolida [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=IGTtFqOiDro

Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., & Guo, W. (2016). Insight into biochar properties and its cost analysis. Biomass & Bioenergy, 84, 76–86. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.002

Alcalá-Galiano, D. D., Cujilema-Quitio, M. C., León-Revelo, G., Baryolo-González, L., & Ramos-Sánchez, L. B. (2018). Enzymatic production of biodiesel from lignocellulosic biomass. Tecnología Química, 38(1), 138-152. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000100011&lng=es&tlng=en

Álvarez, M. A., Centeno, M. Á., & Odriozola, J. A. (2016). Ru-Ni catalyst in the combined dry-steam reforming of methane: The importance in the metal order addition. Topics in Catalysis, 59(2-4), 303–313.

Álvarez-Falcón, L. (2005). Catalizadores de PT y Ni soportados en óxido de circonio modificado con lantano para la obtención de gas de síntesis (p. 7). México D.F.

Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). Green chemistry: Theory and practice. Oxford University Press.

Aquatic World. (2017). Contaminación provocada por nitrógeno en ecosistemas acuáticos. https://press.parentesys.com/3402/contaminacion-provocada-por-nitrogeno-en-ecosistemas-acuaticos-con20819

Armando, S., & Castañeda, O. (2022). Producción de hidrógeno a partir de glicerol: Un subproducto del biodiésel mediante el proceso de reformado con vapor. Repositorio Institucional Unipamplona.

Arteaga-Pérez, L. E., Segura, C., & Santana, K. D. (2016). Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica. Afinidad, 73(573), 60–68. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5467349

Asami, K., Li, X., Fujimoto, K., Koyama, Y., Sakurama, A., Kometani, N., & Yonezawa, Y. (2003). CO2 reforming of CH4 over ceria-supported metal catalysts. Catalysis Today, 27–31.

Autocompostaje León. (2017). ¿Qué residuos orgánicos puedo compostar en mi casa? (Parte II). https://autocompostajeleon.wordpress.com/2017/02/20/que-residuos-organicos-puedo-compostar-en-mi-casa-parte-ii/

AVEBIOM. (2019). Torrefacción Yilkins: Tecnología para los biocombustibles sólidos. Asociación Española de la Biomasa. https://www.avebiom.org/index.php/biomasanews/tecnologia-

para-fabricar-biocombustibles/torrefaccion-yilkins-tecnologia-para-biocombustibles

Bakkenne, A., Nuttall, W., & Kazantzis, N. (2016). Sankey-diagram-based insights into the hydrogen economy of today. International Journal of Hydrogen Energy, 41(19), 7744–7753. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.216

Bakkiyaraj, S., Syed, M. B., Devanesan, M. G., & Thangavelu, V. (2015). Production and optimization of biodiesel using mixed immobilized biocatalysts in packed bed reactor. Environmental Science and Pollution Research, 23(10), 9276–9283. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4583-7

Balat, M. (2008). Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. International Journal of Hydrogen Energy, 33(15), 4013–4029. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.044

Balat, M., Balat, H., & Öz, C. (2008). Progress in bioethanol processing. Progress in Energy and Combustion Science, 34(5), 551–573. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.11.001

Barbosa, M. J., Rocha, J. M. S., Tramper, J., & Wijffels, R. H. (2001). Acetate as a carbon source for hydrogen production by photosynthetic bacteria. Journal of Biotechnology, 85(1), 25–33.

Barrezueta-Unda, S., Bonilla, H. R., & Hidalgo, M. R. (2023). Características principales del biocarbón derivado de restos de Theobroma cacao L. para su uso en suelos agrícolas. Revista

Colombiana de Química, 52(1), 19-24. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v52n1.110591

Barth, F., Vanhoudt, W., Londo, M., Jansen, J. C., Veum, K., & Castro, J. (2015). Technical report on the definition of "CertifiHy Green" hydrogen (D2.4,5).

Basseches, J., & Sauer, S. (2023). El boom de los biocombustibles en Brasil: ¿economía verde o greenwashing? OpenDemocracy. https://www.opendemocracy.net/es/eboom--biocombustibles-brasil-economia-verde-greenwashing/

Basso, L. C., Basso, T. O., & Rocha, S. N. (2013). Bioethanol production in Brazil. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 30(4), 787–795. https://doi.org/10.1590/S0104-66322013000400001

Basu, P., Dhungana, A., Rao, S., & Acharya, B. (2013). Efecto de la presencia de oxígeno en torrefier. Revista del Instituto de Energía, 86(3), 171–176. https://doi.org/10.1179/1743967113Z.00000000060

Bauer, F., Hansen, T., & Nilsson, L. (2022). Assessing the feasibility of archetypal transition pathways towards carbon neutrality - A comparative analysis of European industries. Resources, Conservation and Recycling, 177. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106015

Bernal, M., Alburquerque, J., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. Bioresource Technology, 100(22), 5444–5453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027

Bhandari, R., Trudewind, C. A., & Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - A review. Journal of Cleaner Production, 121, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048

Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 28(4), 1327–1350. https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9

Bhutto, A. W., Bazmi, A. A., & Zahedi, G. (2013). Underground coal gasification: From fundamentals to applications. Progress in Energy and Combustion Science, 39(1), 189–214.

BioEconomía.info. (2023). Torrefacción de biomasa: un avance hacia la energía sostenible del futuro. https://www.bioeconomia.info/2023/08/31/torrefaccion-de-biomasa-un-avance-hacia-la-energia-sostenible-del-futuro/

Bockris, J. O. M. (2013). The hydrogen economy: Its history. International Journal of Hydrogen Energy, 38(6), 2579–2588.

Brenes, M. U., & Jaikel Víquez, J. (2021). Evaluación del efecto del pretratamiento del rastrojo de piña, para la producción de

hidrógeno vía reformado en fase acuosa (APR). Revista Ingeniería, 31(2), 1–21. https://doi.org/10.15517/ri.v31i2.43545

Bridgwater, A. V. (1999). Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 51(1–2), 3–22. https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00005-4

Buenaño, D. (2024). Economía circular a nivel global: avances, desafíos y la experiencia de Ecuador. Universidad de Las Américas. https://sitios.udla.edu.ec/2024/02/economia-circular-a-nivel-global-avances-desafios-y-la-experiencia-de-ecuador-diego-buenano/

Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2440–2454. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003

Cahyanti, M. N., Doddapaneni, T. R. K. C., Madissoo, M., Pärn, L., Virro, I., & Kikas, T. (2021). Torrefaction of agricultural and wood waste: Comparative analysis of selected fuel characteristics. Energies, 14(10), 2774. https://doi.org/10.3390/en14102774

Canaan. (2024). Granulador de lecho fluido - lecho fluidizado. Zhejiang Canaan Technology Limited.

Cartín Muñoz, F., & Ulate Brenes, M. A. (2019). Evaluación del desempeño de un catalizador de níquel/alúmina en distintas condiciones de operación para la producción de hidrógeno mediante reformado de metanol en fase acuosa (APR). Revista Ingeniería, 30(1), 44–58. https://doi.org/10.15517/ri.v30i1.38900

Castells, X., & Velo, E. (2012). La pirólisis. En Tratamiento y valoración energética de residuos (pp. 478–537). Ediciones Díaz de
Santos. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=29Vl_0IqlnoC&oi=fnd&pg=PA478&dq=Pirolisis&ots=-2WcowqaUP&sig=HQWmhfnpPTAuX8SN9CwMo7mJ6lM&redir_esc=y#v=onepage&q=Pirolisis&f=false

Cayo Reinoso, E. L. (2018). Obtención de un biocombustible sólido por torrefacción húmeda a partir de la cáscara de la mazorca de cacao para la generación de energía [Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital EPN. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19594

Cener BIO2C. (2024). Biocombustibles sólidos a partir de biomasa residual. https://www.bio2c.es/

Cerqueira, P., Rocha, C., Soria, M. A., & Madeira, L. M. (2024). Autothermal reforming of distillery wastewater: Thermodynamic modelling and experimental results. Energy Conversion and Management, 309, 118442. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118442

Chaubey, R., Sahu, S., James, O. O., & Maity, S. (2013). A review on development of industrial processes and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and sustainable sources. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 443–462. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.019

Chávez, C., Castillo, L., & García, M. (2020). Gestión de residuos orgánicos en Ecuador: Oportunidades para la agricultura sostenible. Revista de Investigación Agropecuaria, 45(2), 123–134.

Chávez-Sifontes, M., Salvador, S., & Salvador, E. (2019). La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. Anales de Química, 115(5). www.rseq.org

Chen, W.-H., Lin, B.-J., Lin, Y.-Y., Chu, Y.-S., Ubando, A. T., Show, P. L., Ong, H. C., Chang, J.-S., Ho, S.-H., Culaba, A. B., Pétrissans, A., & Pétrissans, M. (2021). Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. Progress in Energy and Combustion Science, 82(100887). https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887

Chen, W.-H., Peng, J., & Bi, X. T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44, 847–866. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039

Chero, P. (2018). El hidrógeno verde, la clave para un futuro energético limpio. VIX -

Hidrógeno. https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/blank-cjg9

Chhandama, M. V. L., Ruatpuia, J. V. L., Ao, S., Chetia, A. C., Satyan, K. B., & Rokhum, S. L. (2023). Microalgae as a sustainable feedstock for biodiesel and other production industries: Prospects and challenges. Energy Nexus, 12. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100255

Choudhary, V. R., & Rajput, A. M. (1996). Simultaneous carbon dioxide and steam reforming of methane to syngas over NiO–CaO catalyst. Industrial & Engineering Chemistry Research, 35(11), 3934–3939. https://doi.org/10.1021/ie9600021

Comisión de Gasolina-Gasoil QO6. (2008). Síntesis de aditivos (ETBE y MTBE). https://quimorg6.blogspot.com/2008/11/sintesis-de-aditivosetbe-y-mtbe.html

Conecta, C. (2023, 27 de mayo). Reactores para el cultivo de microalgas. LinkedIn. https://es.linkedin.com/pulse/reactores-para-el-cultivo-de-microalgas-cognita-conecta

Cosmos. (2014). Bioetanol como combustible. https://www.cosmos.com.mx/blog/bioetanol-como-combustible/

Costa e Silva, W., Freitas, L., Oliveira, P. C., & de Castro, H. F. (2016). Continuous enzymatic biodiesel production from coconut oil in two-stage packed-bed reactor incorporating an extracting column to remove glycerol formed as by-product. Bioprocess and

Biosystems Engineering, 39(10), 1611–1617. https://doi.org/10.1007/s00449-016-1636-3

Da Maia, J., Cardoso, J., Da Silveira Mastrantonio, D., Bierhals, C., Moreira, J., Costa, J., & De Morais, M. (2020). Microalgae starch: A promising raw material for the bioethanol production. International Journal of Biological Macromolecules. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.159

Dave, N., Selvaraj, R., Varadavenkatesan, T., & Vinayagam, R. (2019). A critical review on production of bioethanol from macroalgal biomass. Algal Research. https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101606

Delgado Vellosillo, I. (2020). Obtención de bioetanol mediante procesos de fermentación con levaduras: Revisión bibliográfica [Undergraduate thesis, Facultad de Ciencias].

Desservettaz, M., Pikridas, M., Stavroulas, I., Bougiatioti, A., Liakakou, E., Hatzianastassiou, N., Sciare, J., Mihalopoulos, N., & Bourtsoukidis, E. (2023). Emission of volatile organic compounds from residential biomass burning and their rapid chemical transformations. Science of the Total Environment, 903. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166592

Díaz, J. M. L. (2012). Torrefacción. Blogspot.com. https://agronomoglobal.blogspot.com/2012/01/torrefaccion.html

Díaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. Science, 321(5891), 926–929. https://doi.org/10.1126/science.1156401

Doria, M. C. (2009). Química verde: Un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. Educación Química, 20(4). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2009000400004

Dosa, M., Sartoretti, E., Monteverde, A., Bensaid, S., Popescu, I., Marcu, I.-C., Frontera, P., Malara, A., Macario, A., & Piumetti, M. (2024). La-based perovskites for autothermal reforming: In-situ electrical conductivity measurements and catalytic study. Applied Catalysis O: Open, 192, 206959. https://doi.org/10.1016/j.apcato.2024.206959

EcoObjetivo. (2023). Transforman 4.400 toneladas de restos de poda en chips, compost y leña social. https://ecoobjetivo.com.ar/contenido/2084/transforman-4400-toneladas-de-restos-de-poda-en-chips-compost-y-lena-social

EcoPortal. (2024). Químicos verdes: Alquimistas de un futuro más limpio. ECONCIENCIA. https://www.ecoportal.net/econciencia/quimicos/

Eicke, L., & De Blasio, N. (2022). Green hydrogen value chains in the industrial sector—Geopolitical and market implications. Energy Research & Social Science, 93, 102847. https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102847

El Maizal Audiovisual. (2015). El despilfarro y los estándares de calidad en la producción bananera en el Ecuador. https://elmaizalaudiovisual.wordpress.com/2015/01/13/el-despilfarro-y-los-estandares-de-calidad-en-la-produccion-bananera-en-el-ecuador/

El-Emam, R. S., & Özcan, H. (2019). Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. Journal of Cleaner Production, 220, 593–609. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.309

Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z., & Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. Nature Geoscience, 1(10), 636–639. https://doi.org/10.1038/ngeo325

Erlach, B., Harder, B., & Tsatsaronis, G. (2012). Combined hydrothermal carbonization and gasification of biomass with carbon capture. Energy, 45(1), 329–338. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.057

Eroglu, I., Aslan, K., Gündüz, U., Yücel, M., & Türker, L. (1999). Substrate consumption rates for hydrogen production by Rhodobacter sphaeroides in a column photobioreactor. Journal of Biotechnology, 70, 103–113.

Ersahin, M., Cicekalan, B., Cengiz, A. I., Zhang, X., & Ozgun, H. (2023). Nutrient recovery from municipal solid waste leachate in the scope of circular economy: Recent developments and future

perspectives. Journal of Environmental Management, 335, 117518. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117518

Escobedo, M. J., & Calderón, A. C. (2021). Microalgal biomass with high potential for the biofuels production. Scientia Agropecuaria, 12(2), 265–282. https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.030

Espinoza, G. T. (2021). Retrospectiva y prospectiva del desarrollo de las generaciones de biocombustibles. Ciencia y Tecnología, 21, 53–63.

Estrada, C. A., & Zapata, A. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. Scientia et Technica, 10. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4842711.pdf

European Commission. (2020). A new circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe. https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en

Evans, R. J., Czernik, S., Chornet, E., Feik, C. J., French, R., & Phillips, S. D. (2002). Engineering scale up of renewable hydrogen production by catalytic steam reforming of peanut shells pyrolysis products. National Renewable Energy Laboratory.

Fan, Z., & Friedmann, S. J. (2021). Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. Joule, 5(4), 829–862. https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018

Fang, H. H. P., Liu, H., & Zhang, T. (2005). Phototrophic hydrogen production from acetate and butyrate in wastewater. International Journal of Hydrogen Energy, 30, 785–793.

Favorita Ecuador. (2020). Economía circular, un modelo hacia la sostenibilidad. Favorita Bananas. https://www.favoritabananas.com/noticias/28

Fedorov, A. S., Tsygankov, A. A., Rao, K. K., & Hall, D. O. (1998). Hydrogen photoproduction by Rhodobacter sphaeroides immobilized on polyurethane foam. Biotechnology Letters, 20, 1007–1009.

Fernández, C., & Bolaños, B. (2005). Energética del hidrógeno: Contexto, estado actual y perspectivas de futuro. Universidad de Sevilla.

Fernández, L., Espinoza-Montero, P., Sánchez-Sarango, M., Bolaños-Méndez, D., Álvarez-Paguay, J., Domínguez-Granda, L., Rodríguez, A., Romero, H., Debut, A., & Ortiz, V. (2023). Simultaneous quantification of lead, cadmium and zinc in superficial marine sediments using a carbon-fiber microelectrode modified with bismuth film. Scientific Reports, 13, Article 20232. https://doi.org/10.1038/s41598-023-47526-6

Ferrero, G. O., Sánchez-Faba, E., Argañaraz, C. E., Vaschetto, E. G., Herrero, E. R., & Eimer, G. A. (2015). Diseño de biocatalizadores para la producción de biodiésel. In XIX Congreso Argentino de Catálisis - VIII Congreso de Catálisis del Mercosur.

Ferro, D. T., Beatón Soler, P., & Zanzi, R. (2009). Torrefacción de biomasa densificada. Tecnología Química, 29, 180–186.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). Bioeconomy in Latin America and the Caribbean: A strategy for sustainable development. http://www.fao.org

Galloway, J., Leach, A., Bleeker, A., & Erisman, J. (2013). A chronology of human understanding of the nitrogen cycle. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 368(1621), 20130120. https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0120

Galvis Escobar, A. R. (2014). Producción catalítica de hidrógeno a partir de residuos agrícolas (p. 71).

García Bernal, N. (2020). Industria del hidrógeno verde: Costos de producción.

García Peña, L. V., Córdoba Arroyo, M., Busto, M., & Badano, J. M. (2023). Procesamiento de residuos biomásicos a través de gasificación y reformado catalítico: Una ruta hacia la bioeconomía. Química e Industria, 35(1), 47–54. http://hdl.handle.net/11336/232275

Garrapet Embalagens Ltda. (2019). Garrapet: Fábrica de embalagens - Fábrica de garrafa pet. https://garrapet.com.br/

Garrido Sánchez, C. (2020). Estudio de valorización energética de los sarmientos de vid para su utilización en una caldera de biomasa en la bodega Alto Landon [Trabajo académico, Universitat Politècnica de València]. RiuNet. http://hdl.handle.net/10251/157554

Gałuszka, A., Migaszewski, Z., & Namieśnik, J. (2013). The 12 principles of green analytical chemistry and the SIGNIFICANCE mnemonic of green analytical practices. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 50, 78–84. https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.04.010

Geologiaweb. (2021). Los 10 usos del bioetanol más importantes. https://geologiaweb.com/recursos-naturales/usos-del-bioetanol/

Gestores de Residuos. (2021). El proyecto AgroBioHeat explora el potencial de la biomasa en varios países europeos. https://gestoresderesiduos.org/noticias/el-proyecto-agrobioheat-explora-el-potencial-de-la-biomasa-en-varios-paises-europeos

Gitau, M. M., Farkas, A., Ördög, V., & Maróti, G. (2022). Evaluation of the biostimulant effects of two Chlorophyta microalgae on tomato (Solanum lycopersicum). Journal of Cleaner Production, 364. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132689

Goh, B. H. H., Chong, C. T., Ge, Y., Ong, H. C., Ng, J.-H., Tian, B., Ashokkumar, V., Lim, S., Seljak, T., & Józsa, V. (2020). Progress

in utilisation of waste cooking oil for sustainable biodiesel and biojet fuel production. Energy Conversion and Management, 223. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113296

Gómez, M., Lores, M., & Domínguez, J. (2011). Changes in microbial community structure and function during vermicomposting of pig slurry. Bioresource Technology, 128, 408–415. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.057

González, A., López, R., & Martínez, J. (2022). Bioeconomía circular en México: Oportunidades y desafíos. Revista de Economía Ambiental, 15(2), 45–60.

Gramman, J., Millar, G., Rose, G., Drennan, J. (1998). Characterisation of SiO2-supported nickel catalysts for carbon dioxide reforming of methane. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions, 94, 701–710.

Guevara, C. A., Arenas, H. A., Mejía, A., & Peláez, C. A. (2012). Obtención de etanol y biogás a partir de banano de rechazo. Información Tecnológica, 23(2), 19–30. https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200004

Guigou, M. (2011). Producción de bioetanol combustible a partir de boniato. Universidad de la República.

Guo, L., Zhao, J., & Wang, H. (2020). Steam-iron process for hydrogen production: A review. International Journal of Hydrogen Energy, 45(15), 8676–8690.

Guzmán, J. L., Acién, F. G., & Berenguel, M. (2021). Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors. RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial, 18(1), 1–18. https://doi.org/10.4995/RIAI.2020.13604

Hacker, V., Fankhauser, R., Faleschini, G., Fuchs, H., Friedrich, K., Muhr, M., & Kordesch, K. (2000). Hydrogen production by steam–iron process. Journal of Power Sources, 86(1–2), 531–535.

Haines, Goleman, Boyatzis, D., Mckee, R., & Annie. (2019). Hoja de ruta hidrógeno renovable. Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 1689–1699.

He, D., Bultel, Y., Magnin, J. P., Roux, C., & Willison, J. C. (2005). Hydrogen photosynthesis by Rhodobacter capsulatus and its coupling to a PEM fuel cell. Journal of Power Sources, 141, 19–23. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.09.002

Hernández Olvera, N. (2011). Pirólisis de biomasa para producir biocombustible.

Hirel, B., Tétu, T., Lea, P. J., & Dubois, F. (2011). Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. Sustainability, 3(9), 1452–1485. https://doi.org/10.3390/su3091452

Holguín Cardona, J. S. (2019). Obtención de un bioplástico a partir de almidón de papa [Undergraduate thesis, Fundación Universidad de América].

Huang, H., Xiao, D., Zhang, Q., & Ding, L. (2014). Removal of ammonia from landfill leachate by struvite precipitation with the use of low-cost phosphate and magnesium sources. Journal of Environmental Management, 145, 191–198. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.06.021

IDOM. (2019). Planta de bioetanol en Hugoton, Kansas. https://www.idom.com/proyecto/planta-de-bioetanol-en-hugoton-kansas/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

International Energy Agency. (2021). Advanced biofuels – Potential for cost reduction. https://www.iea.org/reports/advanced-biofuels

International Energy Agency. (2022). Global hydrogen review 2022. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022

International Renewable Energy Agency. (2020). Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolysers to meet the 1.5°C climate goal.

Ivanova, S., & Lewis, R. (2012). Producing nitrogen via pressure swing adsorption. Chemical Engineering Progress, 108.

Jácome Sandoya, K. D. (2022). Diseño de una planta para la producción de biocarbón industrial, a partir de cáscaras de cacao por torrefacción húmeda [Trabajo de titulación, Escuela Politécnica

Nacional]. Repositorio Digital EPN. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22178

Jannach, G., Krammer, G., Staudinger, G., & Friedrich, K. (1996). Hydrogen from biomass gasification for fuel cell systems by application of the sponge iron/iron oxide process cycle. Technische Universität Graz.

Jaramillo, F. E., Alvarado, P. N., & Mazo, R. A. (2022). Torrefacción de biomasa en un reactor de tornillo a escala de banco: Efecto de la temperatura y del tipo de biomasa. TecnoLógicas, 25(54), e2269. https://doi.org/10.22430/22565337.2269

Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., van Groenigen, J. W., Hungate, B. A., & Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. Environmental Research Letters, 12(5), 053001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd

Kambo, H. S., & Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 359–378. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050

Kayfeci, M., Keçebaş, A., & Bayat, M. (2019). Hydrogen production. In Solar hydrogen production: Processes, systems and technologies. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5

Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. Revista de Química PUCP, 26, 37–40.

Knothe, G. (2010). Biodiesel and renewable diesel: A comparison. Progress in Energy and Combustion Science, 36(3), 364–373. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.004

Konishi, H., Ichikawa, K., & Usui, T. (2010). Effect of residual volatile matter on reduction of iron oxide in semi-charcoal composite pellets. ISIJ International, 50, 386–389.

Kostyniuk, A., & Likozar, B. (2024). Wet torrefaction of biomass waste into high quality hydrochar and value-added liquid products using different zeolite catalysts. Renewable Energy, 227, 120509. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120509

Kuo, P.-C., Wu, W., & Chen, W.-H. (2014). Gasification performances of raw and torrefied biomass in a downdraft fixed bed gasifier using thermodynamic analysis. Fuel, 117, 1231–1241. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.125

La Huerta de Iván. (2020). Guía completa sobre lixiviados. https://lahuertadeivan.com/guia-completa-sobre-los-lixiviados/

Lam, M. K., & Lee, K. T. (2012). Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. Biotechnology Advances, 30(3), 673–690. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.11.008

Lázaro, I. (2023). Proceso de reformado autotérmico gana popularidad para la producción de hidrógeno azul. INSPENET. https://inspenet.com/noticias/reformado-autotermico-ideal-hidrogeno-azul/

Lee, K. T., Cheng, C. L., Lee, D. S., Chen, W. H., Vo, D. V. N., Ding, L., & Lam, S. S. (2022). Spent coffee grounds biochar from torrefaction as a potential adsorbent for spilled diesel oil recovery and as an alternative fuel. Energy, 239, 122467. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122467

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (2nd ed.). Routledge.

Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J. E., & Whitman, T. (2021). Biochar in climate change mitigation. Nature Geoscience, 14(12), 883–892. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8

Li, C., Liu, R., Zheng, J., Wang, Z., & Zhang, Y. (2021). Production of hydrogen-rich syngas from absorption-enhanced steam gasification of biomass with conch shell-based absorbents. International Journal of Hydrogen Energy, 46(49), 24956–24964.

Li, Y., Fan, X., Zhang, H., Ai, F., Jiao, Y., Zhang, Q., & Zhang, Z. (2022). Pretreatment of corn stover by torrefaction for improving reducing sugar and biohydrogen production. Bioresource

Technology, 351(126905). https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126905

Liaoning Koen Machinery Co., Ltd. (2019). 5000L de cianobacterias Spirulina ChlMade-in-China.com. https://es.made-in-china.com/co_koenmachine/product_5000L-Cyanobacteria-Spirulina-Chlorella-Algae-Pbr-Photo-Bioreactor-Pipeline-Reactor_yuheriougg.html

Liu, X., Zhang, Y., Han, W., Tang, A., Shen, J., Cui, Z., & Zhang, F. (2013). Enhanced nitrogen deposition over China. Nature, 494(7438), 459–462. https://doi.org/10.1038/nature11917

Llenque-Díaz, L. A., Quintana Díaz, A., Torres Lino, L., & Segura Vega, R. (2020). Producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos vegetales. Revista de Investigación Científica REBIOL, 40(1), 21–29. https://doi.org/10.17268/rebiol.2020.40.01.03

López, A. (2016). Producción de hidrógeno mediante el reformado seco de metano con dióxido de carbono en catalizadores unidimensionales a base de níquel (pp. 20–24). Tecnológico de Estudios Superiores San Felipe del Progreso.

López Bermúdez, Y. N., García Nassar, J. de J., Duran Aranguren, D. D., & Sierra Ramírez, R. (2020). Producción de bioetanol a partir de residuos de fruta utilizando Saccharomyces cerevisiae: Una revisión de las diferentes condiciones y métodos de proceso [Undergraduate thesis, Universidad de los Andes].

Lucero, D., Beltrán, M., González, A., & Vázquez, A. (2022). Recycling of nutrients from landfill leachate: A case study. Heliyon, 8(5), e09540. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09540

Mabee, W. E., Gregg, D. J., Arato, C., Berlin, A., Bura, R., Gilkes, N., Mirochnik, O., Pan, X., Pye, E. K., & Saddler, J. N. (2006). Updates on softwood-to-ethanol process development. Applied Biochemistry and Biotechnology, 129–132, 55–70. https://doi.org/10.1385/ABAB:129:1:55

Maeda, I., Miyasaka, H., Umeda, F., Kawase, M., & Yagi, K. (2003). Maximization of hydrogen production ability in high-density suspension of Rhodovulum sulfidophilum cells using intracellular poly(3-hydroxybutyrate) as sole substrate. Biotechnology and Bioengineering, 81, 474–481.

Makoś-Chełstowska, P., Słupek, E., & Gębicki, J. (2024). Agri-food waste biosorbents for volatile organic compounds removal from air and industrial gases – A review. Science of the Total Environment, 945. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173910

Mardani, M., Singh, J., Doustdar, O., Zeraati Rezaei, S., Herreros, M., Millington, P., Pignon, J., & Tsolakis, A. (2025). Investigating butanol–gasoline blend reforming process towards sustainable CO_2 reduction. Fuel, 381, 133526. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133526

Marschner, H. (2012). Mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). Academic Press.

Martini, F., Beghini, G., Zanin, L., Varanini, Z., Zamboni, A., & Ballottari, M. (2021). The potential use of Chlamydomonas reinhardtii and Chlorella sorokiniana as biostimulants on maize plants. Algal Research, 60. https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102515

Meditecna. (2024). Reformado catalítico en la industria del petróleo y gas. https://meditecna.com/blog/reformado-catalitico-en-la-industria-del-petroleo-y-gas

Medrano Barboza, J., & Encalada Rosales, P. E. (2021). Aislamiento, identificación y evaluación del potencial generador de biocombustibles de Desmodesmus communis procedente de la Reserva Biológica Limoncocha [Trabajo de titulación, Universidad Internacional SEK]. Repositorio Universidad Internacional SEK. https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/4095

Mera, M., Recalde, E., & Lema, K. (2019). Evaluación de soluciones de microalgas (Scenedesmus sp.) como bioestimulante natural en el cultivo hidropónico de lechuga (Lactuca sativa). Axioma, 21, 53–60. https://doi.org/10.26621/XV21.2019.12.A06.PUCESI.2550.6684

Messerschmitt. (1911). Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff durch abwechselnde Oxidation und Reduktion von Eisen in von

außen beheizten, in den Heizraumen angeordneten Zersetzern (DE 266863). Germany.

Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., & Dincer, I. (2021). A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and opportunities. International Journal of Hydrogen Energy, 46(50), 25385–25412.

Milanese, C., Jensen, T. R., Hauback, B. C., Pistidda, C., Dornheim, M., Yang, H., Lombardo, L., Zuettel, A., Filinchuk, Y., Ngene, P., de Jongh, P. E., Buckley, C. E., Dematteis, E. M., & Baricco, M. (2019). Complex hydrides for energy storage. International Journal of Hydrogen Energy, 44(15), 7860–7874. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.208

Ministerio de Energía y Minas. (2023). Hoja de ruta del hidrógeno verde en Ecuador. https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/Hoja-de-Ruta-del-Hidrogeno-Verde-en-Ecuador.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable. https://www.miteco.gob.es/images/es/hojarutadelhidrogeno_tcm30-513830.pdf

Moarrefi, S., Jacob, M., Shah, N., Skinner, S., Cai, W., & Fan, L. (2025). Comparison of steam and dry reforming adsorption

kinetics in solid oxide fuel cells. Fuel, 388, 134413. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134413

Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. Engineering in Life Sciences, 12(3), 242–257. https://doi.org/10.1002/elsc.201100085

Montenegro, A. R., Sanjuan, M., & Carmona, M. (2019). Energy storage development using hydrogen and its potential application in Colombia. International Journal of Energy Economics and Policy, 9(6), 254–268. https://doi.org/10.32479/ijeep.8294

Moron, E. (2020). Biocarbón a partir de biomasa de origen doméstico. Preparación y caracterización. Hive Blog. https://hive.blog/steemstem/@emiliomoron/biocarb-n-a-partir-d-1585918802

Moud, P. H., Kantarelis, E., Andersson, K. J., & Engvall, K. (2018). Biomass pyrolysis gas conditioning over an iron-based catalyst for mild deoxygenation and hydrogen production. Fuel, 211, 149–158. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.062

Munar Flórez, D. A., Ramírez Contreras, N. E., & García Núñez, J. A. (2022). Biocarbón como producto de la biomasa residual de palma de aceite en un concepto de economía circular. www.cenipalma.org

Nandhini, R., Berslin, D., Sivaprakash, B., Rajamohan, N., & Vo, D. V. N. (2022). Thermochemical conversion of municipal solid waste

into energy and hydrogen: A review. Environmental Chemistry Letters, 20(3), 1645–1669. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01410-3

Nateras, K. (2024). Cacao, la planta sagrada. Architectural Digest. https://www.admagazine.com/articulos/cacao-la-planta-sagrada-de-los-mayas

Omega Air. (2019). Generadores de nitrógeno y generadores de oxígeno. https://www.ecoportal.net/econciencia/quimicos/

Pasquevich, D. (2004). Tecnología del hidrógeno. Petrotecnia, 55, 58.

PeakD. (2018). El quitosano: Un biopolímero abundante e innovador en muchas aplicaciones. https://peakd.com/spanish/@hirianni/el-quitosano-or-un-biopolimero-abundante-e-innovador-con-muchas-aplicaciones

Pérez, F., Silva, J., & López, M. (2024). Biocombustibles de microalgas: La energía sostenible del futuro. Innovación y Tecnología. https://www.renovablesverdes.com/las-ventajas-de-las-microalgas-como-biocombustibles

Pimsamarn, J., Kaewtrakulchai, N., Wisetsai, A., Mualchontham, J., Muidaeng, N., Jiraphothikul, P., Autthanit, C., Eiad-Ua, A., Laosiripojana, N., & Jadsadajerm, S. (2024). Torrefaction of durian peel in air and N2 atmospheres: Impact on chemical properties and optimization of energy yield using multilevel factorial design. Results in Engineering, 23. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102767

Piñeres Santana, H. D. (2021). Potenciales de producción y uso de hidrógeno verde y azul en diferentes sectores de la economía.

Pino, A. (2009). Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica: El caso de la producción de hidrógeno (Cap. 2). Escuela Técnica Superior de Ingenieros. https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/30127/fichero/Cap%C3%ADtulo+2+-+Producci%C3%B3n+de+Hidr%C3%B3geno.pdf

Poliland. (2019). Polietileno peletizado: Un material reciclado con múltiples aplicaciones. https://poliland.com.co/polietileno-peletizado/

PolimerBio. (2019). PLA y PLLA: Ácido poliláctico y poli-L-láctico. https://polimerbio.com/pla-plla/

Prins, M. J., Ptasinski, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2006). Torrefaction of wood: Part 1. Weight loss kinetics. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 77(1), 28–34. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.01.002

Quintero, M. L. (2021). Reserva Biológica Limoncocha. Del Amazonas. https://delamazonas.com/lugares-turisticos-ecuador/reserva-biologica-limoncocha/

Ramos, M. (2015). Proceso de Haber-Bosch: Síntesis de amoníaco. Moleqla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide, 17, 7–3.

https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero17/Numero_17.pdf

Rebollar, S., Álvarez, A., Puebla, B. J., Jimenez, D. C., & Rebollar, A. R. (2017). Costos de producción y rentabilidad de la caña de azúcar para fruta (Saccharum officinarum) en una región del Estado de México. 41, 808–817. https://doi.org/10.22004/AG.ECON.266441

Rebryk, A., Kozyatnyk, I., & Njenga, M. (2024). Emission of volatile organic compounds during open fire cooking with wood biomass: Traditional three-stone open fire vs. gasifier cooking stove in rural Kenya. Science of the Total Environment, 934, 173183. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173183

Orrego Restrepo, E. (2021). Cambios estructurales fisicoquímicos de la biomasa durante la pirólisis lenta [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79780.

Ribeiro, G. R., Steinmetz, R. L. R., & Wisbeck, E. (2025). Biogas production from solid residues generated in bioethanol production using banana biomass. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 29(3), e282355. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n3e282355

Richardson, S., & Kimura, S. Y. (2019). Water analysis: Emerging contaminants and current issues. Analytical Chemistry, 92(1), 473–505. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b05269

Rico, J. J., Pérez-Orozco, R., Porteiro, J., & Patiño, D. (2023). Effect of air staging and porous inert material on the emission of volatile organic compounds in solid biomass combustion. Fuel, 351. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128907

Rioche, C., Kulkarni, S., Meunier, F. C., Breen, J. P., & Burch, R. (2005). Steam reforming of model compounds and fast pyrolysis bio-oil on supported noble metal catalysts. Applied Catalysis B: Environmental, 61, 130–139.

Ríos Elizalde, P. E., & Romero Bonilla, H. (2014). Cinética de bioadsorción de arsénico utilizando cáscara de banano maduro en polvo [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Machala]. AGRIS. http ://agris.fao.org/search/en/providers/124698/records/669e7aae00eb85b7d72b924e

Rodrigo Vásquez, F., Salinas, D., & Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. (2018). Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile. https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2020/07/23185348/LIBRO-TECNOLOGIAS-H2-Y-PERSPECTIVAS-CHILE.pdf

Romero, H., Medina, J., Farias, M., Jaramillo, E., & Ayala, H. (2024). Nanopartículas de iones de cobre para el control de Fusarium sp. en piña de exportación. Revista Colombiana de Química. Vol. 52 Núm. 3. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v52n3.112172

Rosales Sánchez, Y., Verdecia Acosta, D. M., Linares Álvaro, M. J., Rodríguez Rodríguez, S., Boicet Fabré, T., & Bello Rodríguez, G. (2024). Emisiones de gases contaminantes provenientes de un incendio forestal: Caso “La Colonia” Jiguaní, Granma. Chone, Ciencia y Tecnología, 2(1). https://doi.org/10.56124/cct.v2i1.009

Rostrup-Nielsen, J., Sehested, J., & Nørskov, J. K. (2002). Hydrogen and synthesis gas by steam- and CO2 reforming. Advances in Catalysis. https://doi.org/10.1016/S0360-0564(02)47006-X

Ruiz, P. (2023). Biorrefinerías para apostar por un futuro circular sin residuos. Retema: Revista técnica de medio ambiente. https://www.retema.es/articulos-reportajes/biorrefinerias-para-apostar-por-un-futuro-circular-sin-residuos

Salcedo Cortés, A. (2020). Análisis de viabilidad para la integración de tecnologías Power to Gas a partir de hidrógeno, dentro de una operación de una microrred eléctrica para las zonas rurales en Colombia [Master's thesis, Universidad de los Andes]. http://hdl.handle.net/1992/51524

Saleem, S., Zeshan, Iftikhar, R., Zafar, M. I., & Sohail, N. F. (2022). Growth kinetics of microalgae cultivated in different dilutions of fresh leachate for sustainable nutrient recovery and carbon fixation. Biochemical Engineering Journal, 178, 108299. https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108299

Sánchez, E. (2021). La importancia del nitrógeno en la agricultura. InnoPlant. https://innoplant.es/2021/09/13/la-importancia-del-nitrogeno-en-la-agricultura/

Sandoval Cossío, V. E., & Siles Camacho, M. L. (2021). Estudio comparativo del proceso cinético de reformación de metano con vapor de agua para la obtención de gas de síntesis y producción de metanol basado en 5 tecnologías petroquímicas. Journal Boliviano de Ciencias, 17(50), 112–148. https://doi.org/10.52428/20758944.v17i50.18

Sanz, A. (2022). ¿Y si hablamos de nitrógeno? Climática. https://climatica.coop/alberto-sanz-cobena-nitrogeno/

Schlegel, M. (2021). Wasserstoff: Das Handbuch für Investoren und Projektentwickler. Fichtner.

Sheldon, R. A. (2017). The E factor 25 years on: The rise of green chemistry and sustainability. Green Chemistry, 19(1), 18–43. https://doi.org/10.1039/C6GC02157C

Simões, A. S., Ramos, L., Freitas, L., Santos, J. C., Zanin, G. M., & de Castro, H. F. (2015). Performance of an enzymatic packed bed reactor running on babassu oil to yield fatty ethyl esters (FAEE) in a solvent-free system. Biofuel Research Journal, 2(2), 242–247. https://doi.org/10.18331/BRJ2015.2.2.6

Sinche, D. F., Ramírez, V. E., & Velalcázar, C. M. (2022). Sacarificación y fermentación simultánea de la cáscara de Jatropha curcas pretratada hidrotérmicamente para producción de

bioetanol. Revista Ingeniería, 32(1), 19–32. https://doi.org/10.15517/ri.v32i1.46884

Smith, C., Hill, A., & Torrente, L. (2020). Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. Energy & Environmental Science, 13(2), 331–344. https://doi.org/10.1039/C9EE02873K

Smith, P., Adams, J., Beerling, D. J., Beringer, T., Calvin, K. V., Fuss, S., & Keesstra, S. (2019). Land-management options for greenhouse gas removal and their impacts on ecosystem services and the Sustainable Development Goals. Annual Review of Environment and Resources, 44, 255–286. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033129

Squadrito, G., Maggio, G., & Nicita, A. (2023). The green hydrogen revolution. Renewable Energy, 216, 119041. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119041

Steinberg, M., & Cheng, H. C. (1989). Modern and prospective technologies for hydrogen production from fossil fuels. International Journal of Hydrogen Energy, 14(11), 797–820.

Tan, I. S., & Lee, K. T. (2016). Comparison of different process strategies for bioethanol production from Eucheuma cottonii: An economic study. Bioresource Technology, 199, 336–346. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.008

Tapia, L. (2018). ¿Sabías que la cáscara de camarón puede purificar el agua en Ecuador? El Universo.

https://www.eluniverso.com/noticias/2018/10/21/nota/7007780/sabias-que-cascara-camaron-puede-purificar-agua-ecuador/

Tejada, M., García, A., & Parrado, J. (2009). Effects of a vermicompost composted with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. Catena, 68(2–3), 155–162. https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.01.004

Thengane, S. K., Kung, K. S., Gomez-Barea, A., & Ghoniem, A. F. (2022). Advances in biomass torrefaction: Parameters, models, reactors, applications, deployment, and market. Progress in Energy and Combustion Science, 93, 101040. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101040

Tihamer, S., & Grande, C. (2022). Industrial production of activated carbon using circular bioeconomy principles: Case study from a Romanian company. Cleaner Engineering and Technology, 7, 100443. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100443

Torres, M., Justicia, J., Baeza, J. A., Calvo, L., Heras, F., & Gilarranz, M. A. (2024). Hydrogen production from pruning waste biomass by integration of hydrothermal treatment and aqueous phase reforming. International Journal of Hydrogen Energy, 63, 142–150. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.182

Trasobares Sánchez, J. (2011). Torrefacción de biomasa: Diseño y propuesta económica de una planta experimental [Proyecto fin de carrera, Universidad de Zaragoza]. Repositorio Institucional de Documentos de la Universidad de Zaragoza.

Tripathi, J., Richard, T. L., Memis, B., Demirci, A., & Ciolkosz, D. (2022). Interactions of torrefaction and alkaline pretreatment with respect to glucose yield of hydrolyzed wheat straw. Biomass, 2(4), 264–278. https://doi.org/10.3390/biomass2040018

Troudi, H. E. (2021). Innovaciones con la cáscara de coco a favor del ambiente. https://haimaneltroudi.com/innovaciones-con-la-cascara-de-coco-a-favor-del-ambiente/

Tsukahara, K., & Sawayama, S. (2005). Liquid fuel production using microalgae. Journal of the Japan Petroleum Institute, 48(5), 251–259. https://doi.org/10.1627/jpi.48.251

Tumuluru, J. S., Ghiasi, B., Soelberg, N. R., & Sokhansanj, S. (2021). Biomass torrefaction process, product properties, reactor types, and moving bed reactor design concepts. Frontiers in Energy Research, 9. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.728140

Turare, C. (1997). Biomass gasification technology and utilization. ARTES Institute.

Uemura, Y., Omar, W., Othman, N. A., Yusup, S., & Tsutsui, T. (2013). Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen. Fuel, 103, 156–160. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.018

Łukajtis, R., Hołowacz, I., Kucharska, K., Glinka, M., Rybarczyk, P., Przyjazny, A., & Kamiński, M. (2018). Hydrogen production from biomass using dark fermentation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91, 665–694. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.043

Universidad de Costa Rica. (2018). Disminución de la contaminación generada por el desperdicio y deterioro de desechos del cultivo. https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/6/21/ensilaje-de-rastrojo-de-pina-una-opcion-viable-para-productores-agropecuarios.html

U.S. Department of Energy. (2019). Bioenergy Technologies Office: Advancing the bioeconomy. https://www.energy.gov

Vargas-García, Y., Pazmiño-Sánchez, J., & Dávila-Rincón, J. (2021). Potencial de biomasa en América del Sur para la producción de bioplásticos: Una revisión. Revista Politécnica, 48(2), 7–20. https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2.01

Velazquez Abad, A., & Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. Energy Policy, 138, 111300. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300

Viñán Villagrán, J. A., Puente Riofrío, M. I., Ávalos Reyes, J. A., & Córdova Prócel, J. R. (2018). Proyectos de inversión: Un enfoque práctico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Waheed, Q. M. K., Wu, C., & Williams, P. T. (2016). Pyrolysis/reforming of rice husks with a Ni–dolomite catalyst: Influence of process conditions on syngas and hydrogen yield. Journal of the Energy Institute, 89(4), 657–667. https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.06.002

Wang, C., Peng, J., Li, H., Bi, X. T., Legros, R., Lim, C. J., & Sokhansanj, S. (2013). Oxidative torrefaction of biomass residues

and densification of torrefied sawdust to pellets. Bioresource Technology, 127, 318–325. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.092

Ward, M., Jones, R., Brender, J., de Kok, T., Weyer, P., Nolan, B., & van Breda, S. (2018). Drinking water nitrate and human health: An updated review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(7), 1557. https://doi.org/10.3390/ijerph15071557

Webscolar. (2019). Bioetanol: Proceso de fabricación y su importancia. https://www.webscolar.com/bioetanol-proceso-de-fabricacion-y-su-importancia

Widjaya, E. R., Chen, G., Bowtell, L., & Hills, C. (2018). Gasification of non-woody biomass: A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89, 184–193.

Wikipedia. (2024). Proceso de Haber. https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_de_Haber

Xu, Y., Nordblad, M., Nielsen, P. M., Brask, J., & Woodley, J. M. (2011). In situ visualization and effect of glycerol in lipase-catalyzed ethanolysis of rapeseed oil. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 72(3–4), 213–219. https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2011.06.008

Yadav, A., & Khare, P. (2025). The role of volatile organic compound emissions from aromatic crops in the management of bioaerosols

at agricultural sites: An overview. Journal of Hazardous Materials Advances, 17. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100574

Yáñez Quiroz, R. A., Eugenia, M., Genes, D., Jaramillo Muñoz, A., David, J., & Julio, R. (2024). Evaluación experimental de la torrefacción parcialmente oxidativa de cáscara de coco con fines energéticos [Undergraduate thesis, Universidad de Córdoba]. https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/564b0ae6-df18-4c39-b141-65ed84659ade

Yang, J.-B., Cai, N.-S., & Li, Z.-S. (2008). Hydrogen production from the steam−iron process with direct reduction of iron oxide by chemical looping combustion of coal char. Energy & Fuels, 22(4), 2570–2579. https://doi.org/10.1021/ef800014r

Zhang, F., Li, Y., Yang, M., & Li, W. (2020). Content of heavy metals in animal feeds and manures from farms of different scales in northeast China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(8), 2655. https://doi.org/10.3390/ijerph17082655

Zhang, X., & Liu, Y. (2021). Circular economy-driven ammonium recovery from municipal wastewater: State of the art, challenges and solutions forward. Bioresource Technology, 334, 125231. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125231

Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable

development. Nature, 528(7580), 51–59. https://doi.org/10.1038/nature15743

Zhang, X., Zhao, C., Shao, M., Chen, Y., Liu, P., & Chen, G. (2022). The roadmap of bioeconomy in China. Engineering Biology, 6(4), 71–81. https://doi.org/10.1049/enb2.12026

Zhao, S., Cai, W., Li, Y., Yu, H., Zhang, S., & Cui, L. (2017). Syngas production from ethanol dry reforming over Rh/CeO2 catalyst. Journal of Saudi Chemical Society, 21, 58–65.

Zuriaga, I. (2021). Retos del hidrógeno verde. Economía Aragonesa, 73, 103–129. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8017764

Bioeconomía circular: Transición hacia la sostenibilidad ambiental, energética y social, se publicó en el mes de noviembre de 2026.

ISBN: 978-9907-802-25-2

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

BIOGRAFÍA DE AUTORES

Hugo Ítalo Romero Bonilla:
Docente y tutor de tesis en los Programas de Doctorado en Ingeniería Industrial y en Ciencias Ambientales U de San Marcos, Perú. Jefe Editor de la Revista Biotecnología. Líder Grupo de investigación Aplicaciones Electroanalíticas y Bioenergía de la UTMACH y Docente durante 25 años. He publicado mas de 40 artículos.

Jonathan Josue Echeverria Gia:
Estudiante de pregrado de Ingeniería Química en la Universidad Técnica de Machala. Participe de investigaciones sobre bioeconomía circular aplicada a la producción de biofertilizantes y operaciones unitarias, además, de estar desarrollando en la actualidad una investigación sobre recuperación de metales valiosos a partir de residuos electrónicos.

Lenny Alexia Maldonado Delgado
Estudiante de pregrado de Ingeniería Química en la Universidad Técnica de Machala. Actualmente, cursa un proyecto de investigación sobre el aprovechamiento el pseudotallo de banano como material adsorbente para la recuperación selectiva de arsénico trivalente en soluciones sintéticas. Es coautora de artículos científicos.

BIOECONOMÍA CIRCULAR: TRANSICIÓN HACIA LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL, ENERGÉTICA Y SOCIAL

Estimado lector, Bioeconomía circular: Transición hacia la sostenibilidad ambiental, energética y social aborda la transformación urgente de los modelos productivos lineales extractivos hacia sistemas regenerativos centrados en la valorización integral de la biomasa y los residuos orgánicos. La obra nace como respuesta científica y tecnológica a los desafíos de la crisis energética e impulsa la responsabilidad social universitaria mediante propuestas innovadoras aplicables a los sectores agroindustrial, territorial y urbano.

A lo largo de sus capítulos, el texto explora la sinergia entre la química analítica y la química verde, destaca el desarrollo de sensores electroanalíticos para el monitoreo de contaminantes y la prevención de riesgos ecológicos. Asimismo, analiza estrategias para la recuperación de nutrientes como el nitrógeno a partir de lodos residuales y lixiviados, el aprovechamiento del biohidrógeno, bioetanol y biodiésel, y la aplicación de procesos termoquímicos de conversión como la pirólisis, gasificación y torrefacción para la generación de biocarbones y biocombustibles de alto valor agregado.

Con un marcado enfoque territorial fundamentado en estudios de caso internacionales y proyectos desarrollados en la provincia de El Oro por la Universidad Técnica de Machala, el libro demuestra la factibilidad técnica de transformar residuos bananeros, camaroneros y agropecuarios en soluciones ambientales efectivas. Entre ellas destacan la bioadsorción de metales pesados en agua y suelo, la producción de bioplásticos y la mitigación de la contaminación hídrica.

Dirigida a estudiantes, profesionales, docentes, autoridades de gobiernos locales y agentes de cambio, esta obra constituye una guía conceptual y metodológica clave para transitar hacia un modelo de desarrollo energéticamente autosuficiente, socialmente justo y resiliente ante el cambio climático global.

GRUPO BLR

ISBN: 978-9907-802-25-2

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA 1969