CONAMA 2026

Valorización biotecnológica del CO2 y CH4 biogénicos: procesos, productos y demostradores del proyecto CERNET

De emisiones residuales a materias primas para una bioeconomía circular

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

CONAMA 2026

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor principal de la comunicación: Alessandro Carmona. Responsable de Proyectos. CIRCE – Centro Tecnológico.

Otros autores: Trini de Marco. Investigadora. CIRCE.

Carlos Dorado. Investigador. CIRCE.

Christian Aragón. Responsable de Proyectos. CIRCE.

Índice

1. Emisiones biogénicas de CO_2 y CH_4: de problema climático a recurso industrial 4

1.1. Un reto climático e industrial que no se resuelve con una única tecnología 4

1.2. De la captura al producto: una cadena completa 4

2. Fermentación de CO2: plataformas biológicas e híbridas para combustibles, químicos y materiales 6

2.1. Microorganismos y formas de aportar energía 6

2.2. Productos energéticos y no energéticos 7

2.3. Retos para la implantación 8

3. Fermentación de CH4 y biogás: biopolímeros, ectoína y otros productos de alto valor 9

3.1. El biogás como materia prima de bioproducción 9

3.2. PHA y PHB a partir de metano 9

3.3. Ectoína: un producto de especialidad 10

3.4. La transferencia de metano como cuello de botella 10

4. CERNET: cuatro vías de valorización y tres demostradores europeos 12

4.1. Objetivo y alcance 12

4.2. Demostración, sostenibilidad y replicación 12

5. Conclusiones y prioridades de desarrollo 14

6. Bibliografía 16

1. Emisiones biogénicas de CO_2 y CH_4: de problema climático a recurso industrial

1.1. Un reto climático e industrial que no se resuelve con una única tecnología

La descarbonización industrial requiere combinar medidas con diferentes horizontes de aplicación. La eficiencia energética, la electrificación, la sustitución de combustibles, la circularidad de materiales y la captura de carbono responden a fuentes de emisión y condiciones de proceso distintas. En las industrias intensivas en energía, las mejores técnicas disponibles pueden aportar reducciones inmediatas, pero su margen adicional es limitado cuando una parte relevante de las emisiones procede de las propias reacciones de proceso. La literatura revisada estima que la fabricación consume aproximadamente una cuarta parte de la energía mundial y genera cerca de una quinta parte de las emisiones antropogénicas; además, los sectores más intensivos concentran alrededor del 70 % del consumo y de las emisiones industriales (Rahnama Mobarakeh y Kienberger, 2022). Estas magnitudes justifican el desarrollo de tecnologías complementarias capaces de tratar emisiones difíciles de eliminar.

El carácter biogénico del carbono no elimina automáticamente su efecto climático. El CO2 emitido durante una fermentación o separado en el upgrading de biogás vuelve a la atmósfera si no se captura, mientras que las fugas o la combustión incompleta de CH4 pueden agravar el impacto por el elevado potencial climático del metano. Al mismo tiempo, estas corrientes presentan ventajas frente a gases industriales muy diluidos: algunas proceden de procesos relativamente concentrados, pueden estar disponibles en instalaciones ya equipadas y tienen un origen renovable trazable. Las fuentes biogénicas europeas generan alrededor de 507 Mt de CO2 al año y su potencial de utilización varía ampliamente según la concentración y las impurezas de cada corriente (Rodin et al., 2020). Esta cifra describe el contexto de oportunidad, no un volumen automáticamente disponible para valorización.

1.2. De la captura al producto: una cadena completa

La captura y utilización de carbono (CCU, por sus siglas en inglés) permite emplear el CO2 como materia prima en otro proceso industrial. Frente al almacenamiento geológico, la utilización puede generar productos comercializables y facilitar esquemas de simbiosis industrial, aunque no garantiza por sí sola una reducción neta de emisiones. El balance depende de la energía utilizada, la procedencia del hidrógeno, las pérdidas de gas, el tiempo de permanencia del carbono en el producto, la sustitución real de alternativas fósiles y las etapas de separación y purificación. Por

ello, conviene evaluar la cadena completa mediante análisis de ciclo de vida, análisis económico y criterios de seguridad desde las fases iniciales de diseño.

La calidad del gas condiciona la tecnología aplicable. Las corrientes de fermentación de bioetanol o vino pueden presentar concentraciones elevadas de CO2, mientras que el biogás requiere separar CH4, CO2 y contaminantes como sulfuro de hidrógeno, compuestos orgánicos volátiles, amoniaco, oxígeno o nitrógeno. Los procesos de upgrading mediante membranas, adsorción o absorción permiten obtener biometano y una corriente de CO2, pero añaden consumo energético y costes (Muñoz et al., 2015). La evolución de materiales de membrana —incluidas membranas de matriz mixta, polímeros de microporosidad intrínseca y polímeros térmicamente reordenados— persigue mejorar simultáneamente permeabilidad, selectividad y resistencia al envejecimiento.

Una vez acondicionado el gas, el proceso de conversión necesita aportar energía y poder reductor. En las rutas biológicas de CO2, el hidrógeno renovable puede actuar como donante de electrones; en rutas híbridas, el CO2 puede convertirse primero en metanol o formiato y alimentarse después a microorganismos. En las rutas basadas en CH4 el propio metano aporta carbono y energía a bacterias metanótrofas, pero su baja solubilidad en agua limita la transferencia hacia el cultivo. En ambos casos, la viabilidad depende de la coordinación entre fuente, captura, almacenamiento, transporte, reactor, recuperación del producto y mercado final. Una corriente adecuada químicamente puede no ser viable si su disponibilidad es estacional, la distancia es excesiva o el producto carece de demanda local.

2. Fermentación de CO2: plataformas biológicas e híbridas para combustibles, químicos y materiales

2.1. Microorganismos y formas de aportar energía

La conversión biológica de CO2 se apoya en microorganismos capaces de fijar carbono inorgánico y transformarlo en biomasa o metabolitos. Entre las plataformas estudiadas se encuentran microalgas y cianobacterias fotosintéticas, bacterias autótrofas, clostridios acetogénicos, arqueas y microorganismos modificados mediante ingeniería metabólica (Kajla et al., 2022). Las plataformas fotosintéticas utilizan luz, mientras que las quimioautótrofas obtienen energía de compuestos reducidos, como el hidrógeno. Cada grupo ofrece ventajas y limitaciones diferentes en cuanto a velocidad de crecimiento, densidad celular, tolerancia a impurezas, facilidad de modificación genética, requisitos de luz u oxígeno y espectro de productos. Esta diversidad amplía el abanico de moléculas posibles, pero obliga a seleccionar conjuntamente cepa, reactor y corriente gaseosa.

Las rutas oxihidrogénicas utilizan microorganismos que fijan CO2 con energía procedente de la oxidación de H2 en presencia de O2 (Gleizer et al., 2020). Pueden operar en reactores cerrados, sin requerir superficie agrícola, y producir biomasa rica en proteínas o precursores químicos. Su principal condición es disponer de hidrógeno de baja huella de carbono y gestionar con seguridad mezclas gaseosas potencialmente inflamables. Las rutas acetogénicas y otras fermentaciones de gases emplean CO2, CO o gas de síntesis para producir acetato, etanol y otros compuestos mediante vías como Wood–Ljungdahl (Fackler et al., 2021). La experiencia industrial con gases de proceso demuestra que la bioconversión puede integrarse con emisiones reales, aunque la composición variable y los inhibidores requieren acondicionamiento y control robusto.

Otra opción es separar la generación de energía de la fijación de carbono. La electrosíntesis microbiana suministra electrones mediante electrodos o mediadores como H2 y formiato, de modo que la electricidad renovable impulsa la reducción de CO2 (Jourdin y Burdyny, 2021). Esta configuración evita depender de la iluminación directa del cultivo y puede utilizar reactores oscuros de mayor volumen. No obstante, la transferencia de electrones, la densidad de corriente, la estabilidad de los biofilms y la selectividad del producto siguen siendo áreas de desarrollo. El metanol constituye un intermediario alternativo: puede obtenerse por conversión catalítica de CO2 e H2 y convertirse después, mediante microorganismos metilotrofos, en moléculas de mayor complejidad. Esta combinación integra una etapa termoquímica madura con la selectividad de la biotecnología.

2.2. Productos energéticos y no energéticos

Las rutas de CO2 se han investigado inicialmente para combustibles como metano, etanol, butanol, biodiésel o electrocombustibles. Estos productos pueden facilitar el almacenamiento de energía renovable y atender usos difíciles de electrificar, pero compiten con otras rutas por el hidrógeno verde y requieren grandes escalas para ser económicamente relevantes. La producción de sustancias no energéticas permite trabajar con volúmenes menores y precios unitarios superiores. Entre los productos descritos se encuentran alcoholes, ácidos orgánicos, aminoácidos, proteínas, lípidos, biopolímeros y precursores para alimentación, limpieza, cosmética y materiales. El interés no depende solo del precio: también importa la capacidad de sustituir una materia prima fósil, evitar el uso de azúcar o suelo agrícola y mantener el carbono incorporado durante un periodo útil.

Cuadro 1. Principales plataformas de valorización de CO2 y productos potenciales.

Plataforma	Aporte de energía o electrones	Productos y aplicaciones	Condicionantes principales
Microalgas y cianobacterias	Luz y nutrientes	Biomasa, lípidos, biodiésel, pigmentos y compuestos de interés	Transferencia de luz, superficie, contaminación y costes de cosechado
Fermentación oxihidrogénica	H2 renovable y O2	Biomasa proteica, hidrolizados y aminoácidos	Seguridad de gases, disponibilidad de H2 y recuperación intracelular
Acetógenos y fermentación de gases	H2, CO o gas de síntesis	Acetato, etanol, alcoholes y precursores químicos	Tolerancia a impurezas, selectividad y transferencia gas-líquido
Electrosíntesis microbiana	Electricidad renovable directa o mediadores	Acetato, formiato y otros compuestos reducidos	Densidad de corriente, transferencia de electrones y escalado
Ruta híbrida CO2–metanol–fermentación	H2 renovable, catálisis y metabolismo metilotrofo	L-alanina, ácido L-málico, sorbitol y otros químicos	Pureza del gas, estabilidad del catalizador, integración y logística del metanol
Fermentación autotrófica a PHA	H2 verde y O2	Polihidroxialcanoatos para films y envases	Transferencia de gases, productividad, extracción y calidad del polímero

Fuente: Elaboración propia a partir de información disponible en Carmona-Martínez et al. (2024).

La tabla muestra que no existe una ruta universal. Los productos energéticos requieren normalmente mayores volúmenes y procesos de separación compatibles con especificaciones de combustible. Los productos de especialidad pueden admitir escalas menores, pero exigen pureza, reproducibilidad y validación regulatoria más

estrictas. En todos los casos, las etapas de downstream —separación de biomasa, ruptura celular, concentración, extracción y purificación— pueden determinar una fracción relevante del coste y del impacto. El diseño debe partir de la especificación del producto final, no únicamente de la capacidad del microorganismo para consumir CO2.

2.3. Retos para la implantación

El primer reto es biológico: las cepas naturales no han evolucionado necesariamente para producir a alta velocidad una molécula seleccionada. La ingeniería metabólica puede mejorar rendimiento, tolerancia y selectividad, pero añade necesidades de estabilidad genética, control y evaluación regulatoria. El segundo reto es de ingeniería: la transferencia de H2, CO2 y O2, la retirada de calor, la mezcla y el control del pH deben mantenerse al aumentar el volumen. El tercero es sistémico: la electricidad renovable, el agua, el origen del carbono, la continuidad de suministro y la valorización de coproductos condicionan el balance global. El salto desde pruebas de laboratorio a operación industrial requiere demostraciones en entornos reales, datos prolongados de operación y comparación con tecnologías de referencia.

3. Fermentación de CH4 y biogás: biopolímeros, ectoína y otros productos de alto valor

3.1. El biogás como materia prima de bioproducción

La digestión anaerobia transforma residuos orgánicos heterogéneos en dos corrientes más homogéneas: biogás y digestato. El biogás se ha utilizado tradicionalmente para producir calor y electricidad o, tras el upgrading, biomethano para inyección en red y movilidad. Sin embargo, la reducción de incentivos a la generación eléctrica y la búsqueda de mayor valor por unidad de carbono han impulsado alternativas basadas en la bioconversión. Además de biomethano, el biogás puede servir como precursor de bloques químicos por catálisis o como sustrato para producir biopolímeros, proteína unicelular, exopolisacáridos, ectoína y otros metabolitos mediante bacterias metanótrofas (Cantera et al., 2018).

Las bacterias metanótrofas utilizan CH4 como fuente de carbono y energía. Esta capacidad permite tratar una corriente gaseosa renovable sin recurrir a azúcares refinados, pero la composición del biogás y la presencia de contaminantes pueden afectar al cultivo (Gęsicka et al., 2021). El proceso debe asegurar suministro de oxígeno, nutrientes minerales y condiciones compatibles con el producto objetivo. En algunos casos, el estrés nutricional dirige el carbono hacia materiales de reserva; en otros, la salinidad induce la síntesis de compuestos protectores. La operación puede utilizar biomethano purificado o integrar parcialmente el upgrading con el cultivo, siempre que se controlen la seguridad, la relación CH4/O2 y la calidad del gas.

3.2. PHA y PHB a partir de metano

Los polihidroxialcanoatos (PHA) son poliésteres intracelulares acumulados por diversos microorganismos como reserva de carbono y energía. Determinados metanótrofos de tipo II, entre ellos géneros como Methylocystis, Methylosinus y Methylocella, pueden transformar CH4 en PHA bajo limitación de nutrientes como nitrógeno, fósforo, magnesio o azufre (Pieja et al., 2017).

El atractivo de los PHA reside en su biodegradabilidad, biocompatibilidad y propiedades mecánicas, que permiten plantear aplicaciones en envases, agricultura y biomedicina. Su competitividad depende de la productividad volumétrica, el coste del sustrato, la concentración intracelular, la composición del polímero y el método de extracción. Usar CH4 residual puede reducir el coste de carbono, pero la purificación del gas, el aporte energético a la transferencia y el downstream siguen siendo determinantes. Asimismo, la calidad del PHA debe ajustarse a los requisitos de procesado, estabilidad y contacto con el producto final.

3.3. Ectoína: un producto de especialidad

La ectoína es un aminoácido cíclico que muchas bacterias acumulan como osmoprotector. Se utiliza para estabilizar estructuras celulares y biomoléculas y tiene aplicaciones en cosmética, cuidado personal, farmacia y biotecnología (Becker y Wittmann, 2020). La producción industrial convencional emplea bacterias halófilas o halotolerantes y sustratos azucarados; el proceso de biomilking combina fases de alta y baja salinidad para inducir la acumulación y liberación del compuesto. Esta estrategia evita destruir toda la biomasa, pero exige controlar cuidadosamente la salinidad, el oxígeno y la recuperación del producto. La producción de ectoína a partir de metano propone sustituir azúcares por una corriente residual. La ventaja climática potencial también debe verificarse mediante balance de carbono: convertir CH4 en producto evita su combustión en esa ruta, pero el proceso consume electricidad, aireación y reactivos.

3.4. La transferencia de metano como cuello de botella

La baja solubilidad del CH4 en un medio acuoso limita su disponibilidad para los microorganismos. Aumentar la agitación y la presión mejora la transferencia gas-líquido, pero puede elevar el consumo eléctrico y los costes operativos. Los biofiltros y lechos percoladores son útiles para tratamiento de gases, aunque la inmovilización de biomasa dificulta recuperar productos intracelulares. Por ello, las rutas de PHA y ectoína recurren con frecuencia a cultivos suspendidos en columnas de burbujeo, airlift o tanques agitados y exploran configuraciones intensificadas: reactores con fase no acuosa, flujo Taylor, membranas de difusión, bucles de circulación forzada y recirculación interna de gas (Stone et al., 2017).

Cuadro 2. Rutas biotecnológicas de CH4 y decisiones de diseño.

Ruta	Principio biológico	Producto y uso	Decisiones críticas
CH4 → PHA/PHB	Metanótrofos de tipo II y limitación de nutrientes	Biopolímeros para envases, films y aplicaciones agrícolas	Relación CH4/O2, régimen de nutrientes, productividad y extracción intracelular
CH4 → ectoína	Metanótrofos haloalcalófilos y estrés osmótico	Ingrediente cosmético y protector de biomoléculas	Salinidad, transferencia de CH4 y O2, biomilking y pureza
CH4 → proteína unicelular	Crecimiento metanotrófico con exceso de nitrógeno	Proteína para alimentación animal u otros usos	Seguridad, calidad nutricional, regulación y secado
CH4 → bloques químicos	Metabolismo central o cepas modificadas	Formiato, exopolisacáridos y otros metabolitos	Ingeniería metabólica, selectividad, recuperación y demanda de mercado

Fuente: Elaboración propia a partir de la información disponible en Rojo et al. (2021).

La selección del reactor debe equilibrar transferencia, energía y recuperación. Una configuración con elevada kLa puede mejorar el consumo de metano, pero no será adecuada si daña las células, dificulta el control de salinidad o eleva demasiado el consumo eléctrico. De forma similar, una extracción muy selectiva puede perder ventaja si requiere gran cantidad de disolventes. La integración con plantas de biogás ofrece oportunidades —gas disponible, servicios comunes y conocimiento operativo—, pero exige adaptar equipos ATEX, almacenamiento, control de fugas y protocolos de operación a cada emplazamiento.

4. CERNET: cuatro vías de valorización y tres demostradores europeos

4.1. Objetivo y alcance

CERNET es una acción de innovación orientada a demostrar cadenas de valor de base biológica que conviertan carbono gaseoso biogénico en productos químicos e ingredientes de alto valor. El proyecto trabaja con CO2 y CH4 procedentes de plantas de residuos, producción de bioetanol, bodegas y tratamiento de residuos agrícolas. El planteamiento integra captura y purificación, cinco tecnologías de conversión —cuatro biológicas y una termo-catalítica—, procesos de recuperación, energías renovables, validación de productos, evaluación de sostenibilidad y modelos de negocio. CERNET prevé cuatro cadenas de valor, seis productos finales y tres demostradores en Italia, Bulgaria–Eslovenia y España. CERNET plantea llevar siete tecnologías desde niveles iniciales próximos a TRL 4–5 hasta TRL 6–7, según la tecnología. Esta demostración en entorno relevante permitirá obtener datos de operación, calidad, sostenibilidad y coste que no pueden deducirse únicamente de ensayos de laboratorio.

Cuadro 3. Las cuatro cadenas de valor previstas en CERNET.

Vía	Fuente de carbono	Conversión	Productos	Validación prevista
I	CO2 separado del biogás de residuos municipales	Fermentación oxihidrogénica y downstream	Hidrolizado proteico y L-alanina	Alimentación/piensos y productos de limpieza
II	CO2 de fermentación de bioetanol	CO2 a metanol; fermentación de metanol	L-alanina, ácido L-málico y sorbitol	Limpieza, alimentación y plásticos
III	CO2 de bodega y planta de biogás	Fermentación autotrófica con H2 verde	PHA	Films y bolsas para aplicaciones agrícolas y vitivinícolas
IV	CH4 de una planta de digestión anaerobia	Fermentación con bacterias metanótrofas	Ectoína	Cosmética y formulación de desodorantes

Fuente: Memoria descriptiva del Proyecto CERNET.

4.2. Demostración, sostenibilidad y replicación

Las cuatro vías cubren modelos de integración diferentes. En Italia, la conversión se conectará con una planta de residuos que ya separa biomethano y genera una corriente de CO2. La demostración Bulgaria–Eslovenia evaluará transporte regional de CO2 y metanol entre plantas. En España, se compararán captura y transporte de

CO2 con conversión in situ de CH4, además de combinar una fuente estacional y otra continua. Esta variedad permitirá estudiar cuándo conviene mover el gas, el intermediario o el producto y cómo influyen la concentración, la distancia, la escala y los servicios disponibles.

CERNET aplicará evaluación ambiental, económica y social del ciclo de vida, así como el marco Safe and Sustainable by Design. Estas herramientas deberán verificar el potencial de reducción de emisiones, identificar transferencias de impacto y orientar decisiones de diseño. El proyecto también desarrollará modelos de negocio, una hoja de ruta regulatoria y de certificación y un sistema digital de apoyo a la replicación. El objetivo no es asumir que cualquier emisión biogénica puede valorizarse, sino identificar combinaciones de fuente, tecnología, producto y territorio con un desempeño mejor que las alternativas de referencia.

5. Conclusiones y prioridades de desarrollo

La fermentación de gases amplía el papel de las plantas de biogás, bodegas, fábricas de bioetanol y otras industrias de base biológica. Además de producir energía, estas instalaciones pueden suministrar carbono para materiales, ingredientes y productos químicos. El CO2 ofrece rutas fotosintéticas, quimioautótrofas, electrobiológicas e híbridas; el CH4 puede convertirse mediante metanótrofos en PHA, ectoína, proteína y otros metabolitos. La diversidad de opciones permite adaptar el producto a la composición y escala de la corriente, pero también aumenta la necesidad de seleccionar con rigor la cadena completa.

El principal límite no es únicamente microbiológico. La transferencia de gases poco solubles, el suministro de H2 y O2, la seguridad, la continuidad de las fuentes, la recuperación del producto, la energía y la logística condicionan la viabilidad tanto como el rendimiento de la cepa. Los procesos deben diseñarse desde el producto final y su mercado, definiendo especificaciones de pureza, volumen y coste antes de escalar el reactor. Asimismo, la reducción climática debe demostrarse mediante balances de ciclo de vida que incluyan la electricidad, el hidrógeno, el transporte, los reactivos, la duración del producto y el escenario de fin de vida.

El proyecto CERNET aportará un marco útil para comparar cuatro cadenas de valor y tres configuraciones territoriales. Su contribución más relevante será generar evidencia de operación en entornos reales y conectar captura, conversión, purificación, validación y replicación. Para avanzar hacia una implantación industrial se recomienda priorizar cinco líneas:

- Demostrar operación continua y estable durante periodos suficientemente largos, con composición real del gas y seguimiento de pérdidas.
- Medir conjuntamente productividad, consumo energético, transferencia de materia, pureza, rendimiento de recuperación y coste.
- Integrar electricidad e hidrógeno renovables con estrategias de operación flexible y requisitos de seguridad específicos.
- Desarrollar procesos de downstream selectivos, reutilizables y de menor impacto, adecuados a productos intracelulares.
- Comparar mediante análisis de ciclo de vida y coste cada ruta con la emisión, la combustión, la inyección de biomethano y la producción convencional del producto.

Cuando estas condiciones se cumplen, la fermentación de CO2 y CH4 puede contribuir simultáneamente a abatir activamente gases de efecto invernadero, reducir la dependencia de carbono fósil o azúcares primarios y crear nuevas cadenas de valor. La prioridad no debe ser valorizar todo el carbono disponible, sino desarrollar procesos

robustos, seguros y verificables en los que el beneficio ambiental y económico se mantenga desde la fuente hasta el uso final.

6. Bibliografía

Becker, J., & Wittmann, C. (2020). Microbial production of extremolytes - high-value active ingredients for nutrition, health care, and well-being. *Current Opinion in Biotechnology, 65*, 118-128. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.02.010

Cantera, S., Muñoz, R., Lebrero, R., López, J. C., Rodríguez, Y., & García-Encina, P. A. (2018). Technologies for the bioconversion of methane into more valuable products. *Current Opinion in Biotechnology, 50*, 128-135. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.12.021

Carmona-Martínez, A. A., Rueda, A. y Jarauta-Córdoba, C. A. (2024). Deep decarbonization of the energy intensive manufacturing industry through the bioconversion of its carbon emissions to fuels. Fuel, 371, 131922. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131922

CERNET Project (2026). Grant Agreement – AMD-101214604-6. https://cernetproject.eu

Fackler, N., Heijstra, B. D., Rasor, B. J., Brown, H., Martin, J., Ni, Z., Shebek, K. M., Rosin, R. R., Simpson, S. D., Köpke, M., Tyo, K. E. J., & Giannone, R. J. (2021). Stepping on the gas to a circular economy: Accelerating development of carbon-negative chemical production from gas fermentation. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 12*, 439-470. https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-120120-021122

Gęsicka, A., Oleskowicz-Popiel, P., & Łężyk, M. (2021). Recent trends in methane to bioproduct conversion by methanotrophs. *Biotechnology Advances, 53*, 107861. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107861

Gleizer, S., Bar-On, Y. M., Ben-Nissan, R., & Milo, R. (2020). Engineering microbes to produce fuel, commodities, and food from CO2. *Cell Reports Physical Science, 1*, 100223. https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100223

Jourdin, L., & Burdyny, T. (2021). Microbial electrosynthesis: Where do we go from here? *Trends in Biotechnology, 39*(4), 359-369. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.10.014

Kajla, S., Kumari, R., & Nagi, G. K. (2022). Microbial CO2 fixation and biotechnology in reducing industrial CO2 emissions. *Archives of Microbiology, 204*, 149. https://doi.org/10.1007/s00203-021-02677-w

Muñoz, R., Meier, L., Diaz, I., & Jeison, D. (2015). A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 14*, 727-759. https://doi.org/10.1007/s11157-015-9379-1

Pieja, A. J., Morse, M. C., & Cal, A. J. (2017). Methane to bioproducts: The future of the bioeconomy? *Current Opinion in Chemical Biology, 41*, 123-131. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2017.10.024

Rahnama Mobarakeh, M., & Kienberger, T. (2022). Climate neutrality strategies for energy-intensive industries: An Austrian case study. *Clean Engineering and Technology, 10*, 100545. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100545

Rodin, V., Lindorfer, J., Böhm, H., & Vieira, L. (2020). Assessing the potential of carbon dioxide valorisation in Europe with focus on biogenic CO2. *Journal of CO2 Utilization, 41*, 101219. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101219

Rojo, E., Carmona, A., Soto, C., Díaz, I., Fernández-Polanco, M., Palacio, L., Muñoz, R. y Bolado, S. (2021). Environment and Material Science Technology for Anaerobic Digestion-Based Circular Bioeconomy. En Biomass, Biofuels, Biochemicals (pp. 25–49 del capítulo). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821878-5.00024-6

Stone, K. A., Hilliard, M. V., He, Q. P., & Wang, J. (2017). A mini review on bioreactor configurations and gas transfer enhancements for biochemical methane conversion. *Biochemical Engineering Journal, 128*, 83-92. https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.09.003

CONAMA 2026