



POSIBILIDADES DE DESARROLLO SOSTENIBLE: LA SINERGIA ENTRE BIORREFINERÍA, NANOTECNOLOGÍA Y ENERGÍAS LIMPIAS

Recibido: 15 noviembre, 2024 • Revisado: 9 diciembre, 2024 • Aceptado: 20 diciembre, 2024

José Roberto Vega Baudrit,
Diego Batista Menezes
y Mary Lopretti

RESUMEN

El documento aborda la integración de la biorrefinería, nanotecnología y energía limpia como una solución sinérgica para promover la sostenibilidad. Se explora el uso de catalizadores nanométricos, sistemas de nanofiltración y nanosensores en biorrefinerías para mejorar la eficiencia y calidad de productos como biocombustibles y bioplásticos. Además, se destacan los beneficios ambientales y económicos de valorizar residuos agroindustriales y marinos, promoviendo la economía circular y reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero. Finalmente, se discuten los desafíos de implementación, incluyendo la escalabilidad, regulación y aceptación pública, proponiendo la inversión en I+D y políticas públicas claras como estrategias clave para maximizar los beneficios de estas tecnologías en la transición hacia una economía sostenible y baja en carbono.

Palabras clave: Biorrefinería, Nanotecnología, Energías limpias, Economía circular, Sostenibilidad.

ABSTRACT

The document addresses the integration of biorefinery, nanotechnology, and clean energy as a synergistic solution to promote sustainability. It explores nanoscale catalysts, nanofiltration systems, and nanosensors in biorefineries to enhance efficiency and the quality of products such as biofuels and bioplastics. Additionally, it highlights the environmental and economic benefits of valorizing agro-industrial and marine waste, fostering a circular economy, and reducing greenhouse gas emissions. Finally, implementation challenges, including scalability, regulation, and public acceptance, are discussed, with investment in R&D and clear public policies proposed as critical strategies to maximize the impact of these technologies in the transition to a sustainable, low-carbon economy.

Keywords: Biorefinery, Nanotechnology, Clean energy, Circular economy, Sustainability.

José Vega Baudrit es Director del Laboratorio Nacional de Nanotecnología LANOTEC CENAT (Costa Rica). Es profesor de LEAD University y de la Universidad Nacional, Escuela de Química.

Diego Batista Menezes es investigadora del Laboratorio Nacional de Nanotecnología LANOTEC CENAT (Costa Rica).

Mary Lopretti es investigadora del Centro de Investigación Nuclear, Facultad de Ciencias de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

INTRODUCCIÓN

La **biorrefinería** es un modelo de procesamiento sostenible que utiliza biomasa como materia prima para generar una amplia gama de productos como biocombustibles, químicos y materiales, promoviendo la economía circular y la reducción de residuos. La **nanotecnología**, por su parte, se enfoca en el diseño y manipulación de materiales a escala nanométrica, lo que permite desarrollar soluciones innovadoras con aplicaciones en diversos campos como la medicina, la electrónica y la producción eficiente de energía. En este contexto, la **energía limpia** se refiere a fuentes de energía que no generan emisiones contaminantes, como la solar, eólica e hidroeléctrica, y que pueden ser optimizadas mediante tecnologías avanzadas, incluidas las basadas en nanotecnología, para garantizar una transición hacia sistemas energéticos sostenibles y amigables con el medio ambiente.

La integración de biorrefinería, nanotecnología y energía limpia constituye un enfoque sinérgico y multidisciplinario para abordar los retos ambientales, energéticos y de sostenibilidad actuales. Este artículo explora cómo la nanotecnología puede potenciar los procesos de biorrefinería mediante el uso de catalizadores nanométricos que incrementan la eficiencia en la conversión de biomasa, así como el papel de los sistemas de nanofiltración para mejorar la calidad de

los biocombustibles y la utilización de nanosensores que permiten un monitoreo preciso de los procesos (Sheldon y Woodley, 2018). La **conversión de biomasa** es el proceso mediante el cual la materia orgánica, como residuos agrícolas, forestales o algas, se transforma en productos útiles, como biocombustibles, energía, químicos y materiales. Este proceso puede implicar diversas tecnologías, como la conversión termoquímica (pirólisis, gasificación o combustión), biológica (fermentación o digestión anaeróbica) o físico-química (extracción y transesterificación de aceites). La conversión de biomasa no solo ofrece una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, sino que también contribuye a la economía circular al aprovechar residuos orgánicos y reducir la huella ambiental.

La nanotecnología tiene el potencial de revolucionar las biorrefinerías al introducir catalizadores más efectivos, los cuales pueden acelerar las reacciones químicas, reducir los requerimientos energéticos y aumentar el rendimiento de los productos deseados. Además, los sistemas de nanofiltración pueden ser utilizados para purificar los biocombustibles, eliminando impurezas y mejorando la calidad del producto final, lo que resulta en combustibles más limpios y eficientes. Los nanosensores, por su parte, ofrecen una herramienta avanzada para el monitoreo en tiempo real de las condiciones dentro de la biorrefinería, facilitando la optimización de los procesos y reduciendo los costos operativos.

FIGURA 1. SISTEMA DE INTEGRACIÓN ENTRE LA BIORREFINERÍA, LA NANOTECNOLOGÍA Y LA ENERGÍA LIMPIA



Fuente propia, 2024.

Cuando estos avances tecnológicos se integran en biorrefinerías que aprovechan residuos agroindustriales y marinos, el impacto positivo se multiplica. La producción de energías renovables, como el bioetanol y el biogás, junto con la reducción significativa de residuos y la generación de productos innovadores con valor agregado, son contribuciones claves para la economía circular (Cherubini, 2010). Este enfoque sinérgico permite no solo la producción sostenible de energía, sino también el desarrollo de nuevos materiales y productos que cierran los ciclos de producción, mejorando la eficiencia general del sistema y minimizando el impacto ambiental.

Como se observa en la Figura 1, la sinergia entre estas áreas tecnológicas ofrece un potencial significativo para avanzar hacia un modelo de producción más sostenible y bajo en carbono, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (Serrano, Rus y García Martínez, 2009; Liu *et al.*, 2010).

BIORREFINERÍA DE DESECHOS AGROINDUSTRIALES Y MARINOS

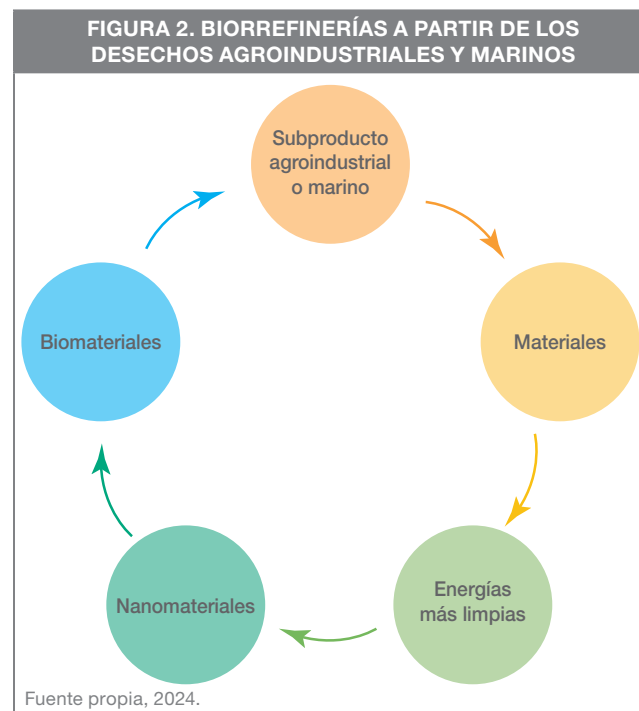
Los desechos agroindustriales, como cáscaras de frutas, tallos y restos de cultivos, así como los residuos marinos, que incluyen algas y biopolímeros derivados de organismos marinos, son materias primas con un potencial significativo para la valorización. Como se observa en la Figura 2, estas biorrefinerías procesan estos materiales para extraer compuestos que puedan utilizarse en diversas industrias, desde la energética hasta la de materiales avanzados como los biomateriales y los nanomateriales.

Economía circular y sostenibilidad

El uso de subproductos derivados de procesos industriales y biológicos no solo minimiza el impacto ambiental al reducir la cantidad de residuos, sino que también disminuye la dependencia de recursos no renovables. Este enfoque contribuye directamente a los principios de la economía circular, promoviendo la reutilización y el aprovechamiento eficiente de los materiales (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

En particular, las algas desempeñan un papel fundamental en la producción de biocombustibles de tercera generación. Estos biocombustibles representan una alternativa con ventajas significativas en términos de

eficiencia y de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación tanto con los combustibles fósiles tradicionales como con los biocombustibles de generaciones anteriores (Prasad, Bhattacharyya y Nguyen, 2017). Al ser altamente productivas y no competir directamente con tierras cultivables destinadas a la producción de alimentos, las algas se posicionan como una opción sostenible y eficiente para la producción de bioenergía (Chew *et al.*, 2018).



El enfoque hacia una economía circular en la producción de biocombustibles no solo implica el aprovechamiento de los residuos, sino también la integración de tecnologías que promuevan ciclos cerrados de materia y energía, maximizando el uso de recursos disponibles y minimizando las pérdidas al medio ambiente. Esto se alinea con la necesidad urgente de cambiar hacia sistemas productivos más sostenibles y resilientes que puedan asegurar el bienestar de las futuras generaciones (Korhonen, Honkasalo y Seppälä, 2018).

Productos Clave de las Biorrefinerías

Biocombustibles

- **Bioetanol y el biogás:** son combustibles renovables generados a partir de biomasa residual mediante procesos fermentativos. Estos

biocombustibles constituyen alternativas sostenibles y viables para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. El bioetanol se produce a partir de la fermentación de azúcares presentes en materiales como residuos agroindustriales, caña de azúcar, maíz y otros cultivos ricos en carbohidratos. Por otro lado, el biogás se obtiene a partir de la digestión anaeróbica de materia orgánica, que incluye desechos agrícolas, estiércol, y restos de alimentos, proceso mediante el cual se genera una mezcla de metano y dióxido de carbono, que puede ser utilizada como fuente de energía limpia y renovable (Demirbas, 2009). La **biomasa residual** se refiere a los materiales orgánicos derivados de residuos agrícolas, forestales, industriales o urbanos que no tienen un uso primario y pueden ser aprovechados como fuente de energía o para la producción de bioproductos. Ejemplos comunes incluyen restos de cultivos, desechos de la industria alimentaria, lodos de depuradoras, residuos de madera y residuos sólidos urbanos biodegradables. Este tipo de biomasa tiene un alto potencial en modelos sostenibles, ya que su valorización permite reducir la generación de residuos, mitigar el impacto ambiental y generar productos como biocombustibles, energía térmica o electricidad, promoviendo la economía circular y la eficiencia en el uso de recursos.

La producción de bioetanol y biogás no solo contribuye a la reducción de las emisiones de carbono, sino que también promueve el aprovechamiento de los residuos orgánicos, aportando a la economía circular y disminuyendo los problemas ambientales asociados con la disposición de dichos residuos (Popp *et al.*, 2014). Además, estos combustibles renovables tienen el potencial de diversificar la matriz energética y aumentar la seguridad energética de las naciones, especialmente en contextos rurales donde la biomasa es abundante (Angelidaki *et al.*, 2018).

- **Biodiésel de Microalgas:** El biodiésel producido a partir de microalgas es un biocombustible avanzado con un enorme potencial para contribuir a la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. Las microalgas presentan ventajas

significativas sobre otras fuentes de biomasa debido a su alta productividad y su ciclo de vida corto, lo cual permite una rápida acumulación de lípidos que pueden ser convertidos en biodiésel (Chisti, 2007). A diferencia de los cultivos convencionales utilizados para producir biodiésel, como la soja o la palma de aceite, las microalgas no requieren grandes extensiones de tierra ni compiten con la producción de alimentos, lo que mejora su perfil ambiental y minimiza el impacto sobre la seguridad alimentaria (Liu *et al.*, 2010; Mata *et al.*, 2010).

El cultivo de microalgas también ofrece la posibilidad de utilizar aguas residuales como medio de crecimiento, lo cual no solo reduce los costos de producción, sino que también contribuye al tratamiento de efluentes y a la mitigación de la contaminación (Rawat *et al.*, 2011). Además, el CO₂ necesario para el crecimiento de las microalgas puede ser capturado de fuentes industriales, ayudando a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Brennan y Owende, 2010). Estos factores permiten que el biodiésel de microalgas sea una opción atractiva en la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles que no solo reduzcan la dependencia de combustibles fósiles, sino que también aporten al mejoramiento ambiental.

Bioplásticos

- **Polímeros Biodegradables:** Los polímeros biodegradables, también conocidos como bioplásticos, representan una alternativa prometedora para reducir la dependencia de los plásticos convencionales derivados del petróleo y mitigar los problemas asociados con la contaminación plástica. Estos materiales se producen a partir de fuentes renovables como el almidón, el ácido poliláctico (PLA), y otros polímeros naturales, lo que permite que se degraden de forma más rápida y con menor impacto ambiental en comparación con los plásticos tradicionales (Mazari *et al.*, 2021; Hottle *et al.*, 2017). La producción de bioplásticos contribuye a la reducción de la huella de carbono y ofrece una solución más sostenible en aplicaciones donde los plásticos de

un solo uso son inevitables, como en empaques, utensilios desechables y ciertos dispositivos médicos (Van den Oever *et al.*, 2017).

Además, los polímeros biodegradables presentan un gran potencial para la implementación de la economía circular, ya que se pueden integrar en ciclos de reciclaje biológico, transformándose en compost o utilizándose para la producción de biogás a través de la digestión anaeróbica (Kale *et al.*, 2007). Esto facilita la reincorporación de materiales al ciclo productivo y reduce la acumulación de residuos en el ambiente. A medida que la tecnología avanza y los procesos de producción de bioplásticos se optimizan, se espera que estos materiales puedan competir en costo y rendimiento con los plásticos convencionales, aumentando así su adopción a nivel global (Philp *et al.*, 2013). La producción de bioplásticos a partir de fuentes renovables permite la creación de materiales que se degradan más rápidamente que los plásticos convencionales derivados del petróleo. Estos bioplásticos se usan en aplicaciones como empaques, utensilios de un solo uso y dispositivos médicos, reduciendo significativamente la huella de carbono y la contaminación plástica (Mazari *et al.*, 2021).

Biomateriales avanzados

- **Aplicaciones médicas y de construcción:** Los biomateriales desarrollados a partir de fuentes renovables tienen múltiples aplicaciones, desde matrices para la liberación controlada de medicamentos hasta materiales de construcción sostenibles. La investigación en este campo se centra en mejorar sus propiedades, como la durabilidad y la capacidad de biodegradación, además de su funcionalidad en términos de liberación controlada de agentes terapéuticos (Parveen *et al.*, 2012).

NANOTECNOLOGÍA APLICADA A LA BIORREFINERÍA

La nanotecnología desempeña un papel fundamental en la optimización de los procesos de biorrefinería y en el desarrollo de productos innovadores. Entre las principales aplicaciones se incluyen:

- **Catalizadores nanométricos:** Los catalizadores a escala nanométrica mejoran la eficiencia y selectividad en los procesos de conversión de biomasa, favoreciendo reacciones más limpias y eficientes. Los catalizadores basados en nanopartículas de metales nobles, como el platino y el paladio, han demostrado ser particularmente efectivos para mejorar las tasas de conversión y la eficiencia energética (Zhang *et al.*, 2008).
- **Purificación y nanofiltración para Purificación:** Tecnologías de filtrado a escala nanométrica permiten la purificación eficiente de biocombustibles y biopolímeros, mejorando la calidad del producto final y reduciendo la presencia de impurezas. Los sistemas de nanofiltración, como las membranas de nanocompuestos, han mostrado una alta selectividad y resistencia química, lo que las hace ideales para aplicaciones industriales (Etheridge *et al.*, 2013).
- **Monitoreo y sensorización Avanzada:** Los nanosensores permiten el monitoreo en tiempo real de variables críticas durante los procesos de biorrefinería, mejorando el control y la eficiencia general del sistema. Los sensores basados en nanotubos de carbono y nanopartículas metálicas pueden detectar cambios mínimos en la composición de la biomasa, facilitando ajustes precisos durante la producción (Wagner *et al.*, 2006).

NANOMATERIALES EN LA BIORREFINERÍA

En este contexto, los nanomateriales también desempeñan un papel crucial:

- **Nanopartículas Metálicas:** Utilizadas como catalizadores heterogéneos para reacciones de hidrólisis y transesterificación, mejorando la cinética y eficiencia de los procesos. Las nanopartículas de óxidos metálicos, como el óxido de zinc y el óxido de titanio, han sido particularmente eficaces en la mejora de la eficiencia de conversión de biomasa en biocombustibles (Fadeel y Garcia-Bennett, 2010). La **transesterificación** es un proceso químico mediante el cual un triglicérido (como los aceites vegetales o grasas animales) reacciona con un alcohol (generalmente metanol o etanol) en presencia de un catalizador (ácido o base) para formar ésteres y

glicerol. Este método es ampliamente utilizado en la producción de **biodiésel**, un combustible renovable y biodegradable que puede sustituir al diésel derivado del petróleo.

- **Nanofibras y Nanotubos de Carbono:** Empleados como refuerzos en biomateriales, proporcionando mejoras significativas en resistencia mecánica y estabilidad térmica. Además, las nanofibras de celulosa han mostrado un gran potencial como refuerzos en polímeros biodegradables, creando materiales compuestos de alta resistencia y biodegradabilidad (Peer *et al.*, 2007).
- **Nanocelulosa:** Un nanomaterial derivado de biomasa vegetal que se utiliza en aplicaciones de gran diversidad, como el desarrollo de biocomposites, textiles y dispositivos médicos avanzados. La nanocelulosa presenta propiedades mecánicas superiores y es utilizada para mejorar la estructura y funcionalidad de productos como papel y empaques sostenibles (Liu *et al.*, 2010).

ENERGÍA LIMPIA Y SU SINERGIAS CON LA NANOTECNOLOGÍA Y LA BIORREFINERÍA

Las biorrefinerías contribuyen significativamente al desarrollo de energías limpias mediante la producción de biogás, bioetanol y otros combustibles avanzados, como el hidrógeno. La nanotecnología potencia estas soluciones al permitir:

- **Celdas solares con nanomateriales:** La incorporación de materiales nanoestructurados mejora la eficiencia de conversión fotovoltaica, permitiendo una mayor captación de luz y una mayor eficiencia cuántica. Las perovskitas –clase de materiales con una estructura cristalina específica, típicamente descrita por la fórmula general ABX_3 , donde “A” y “B” son cationes y “X” es un anión, comúnmente oxígeno o haluros– a nanoescala han emergido como una de las tecnologías más prometedoras para incrementar la eficiencia de las celdas solares de manera significativa (Prasad, Bhattacharyya y Nguyen, 2017). Un ejemplo concreto de implementación es el uso de perovskitas en celdas solares híbridas, las cuales han logrado eficiencias superiores al 25% en condiciones de laboratorio. Estas celdas ofrecen la ventaja de ser más económicas de producir

en comparación con las celdas solares tradicionales basadas en silicio, lo que podría facilitar una adopción más amplia a nivel comercial.

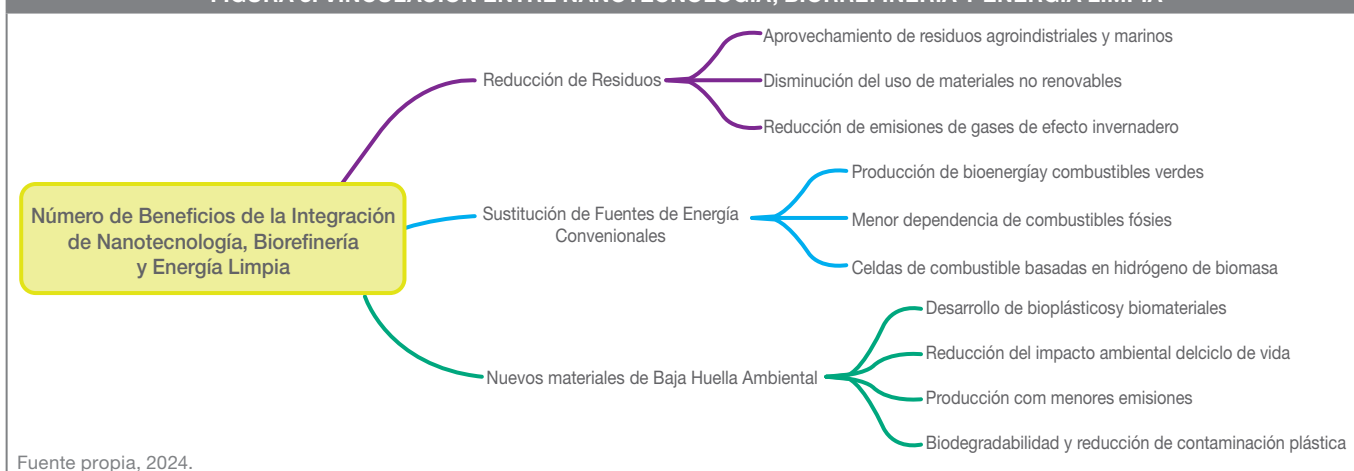
- **Almacenamiento Avanzado de Energía:** El desarrollo de supercondensadores basados en nanomateriales permite una mayor capacidad de almacenamiento y una liberación rápida de energía, lo cual es esencial para la integración de fuentes renovables en la red eléctrica. Los supercondensadores con electrodos de grafeno están siendo ampliamente (Serrano, Rus y García Martínez, 2009; Liu *et al.*, 2010).

BENEFICIOS DE LA INTEGRACIÓN DE NANOTECNOLOGÍA, BIORREFINERÍA Y ENERGÍA LIMPIA

La integración de nanotecnología, biorrefinería y energía limpia proporciona beneficios claros (Figura 3):

- **Reducción de residuos:** El aprovechamiento de residuos agroindustriales y marinos reduce la contaminación y promueve la generación de valor agregado a partir de subproductos. Además, contribuye a la reducción del uso de materiales no renovables y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (Cherubini, 2010; Pang, 2019; Takkellapati, Li y González, 2018).
- **Sustitución de fuentes de energía convencionales:** La producción de bioenergía y combustibles verdes ayuda a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, mitigando así las emisiones de gases de efecto invernadero. El uso de tecnologías avanzadas, como celdas de combustible basadas en hidrógeno producido a partir de biomasa, se perfila como una alternativa viable a mediano plazo (Serrano, Rus y García Martínez, 2009; Liu *et al.*, 2010).
- **Nuevos materiales de baja huella ambiental:** Los bioplásticos y biomateriales desarrollados con el apoyo de la nanotecnología permiten reducir el impacto ambiental asociado al ciclo de vida de los materiales, promoviendo una transición hacia productos más sostenibles y menos dependientes de derivados del petróleo (Santana Cabello *et al.*, 2020; Díaz Marcos *et al.*, 2021). Estos materiales también pueden contribuir de manera significativa a la reducción de la huella

FIGURA 3. VINCULACIÓN ENTRE NANOTECNOLOGÍA, BIORREFINERÍA Y ENERGÍA LIMPIA



de carbono a nivel global, ya que su producción genera menos emisiones en comparación con los materiales tradicionales. Además, los bioplásticos y biomateriales suelen ser biodegradables, lo cual minimiza la acumulación de desechos plásticos y ayuda a disminuir la contaminación ambiental a largo plazo.

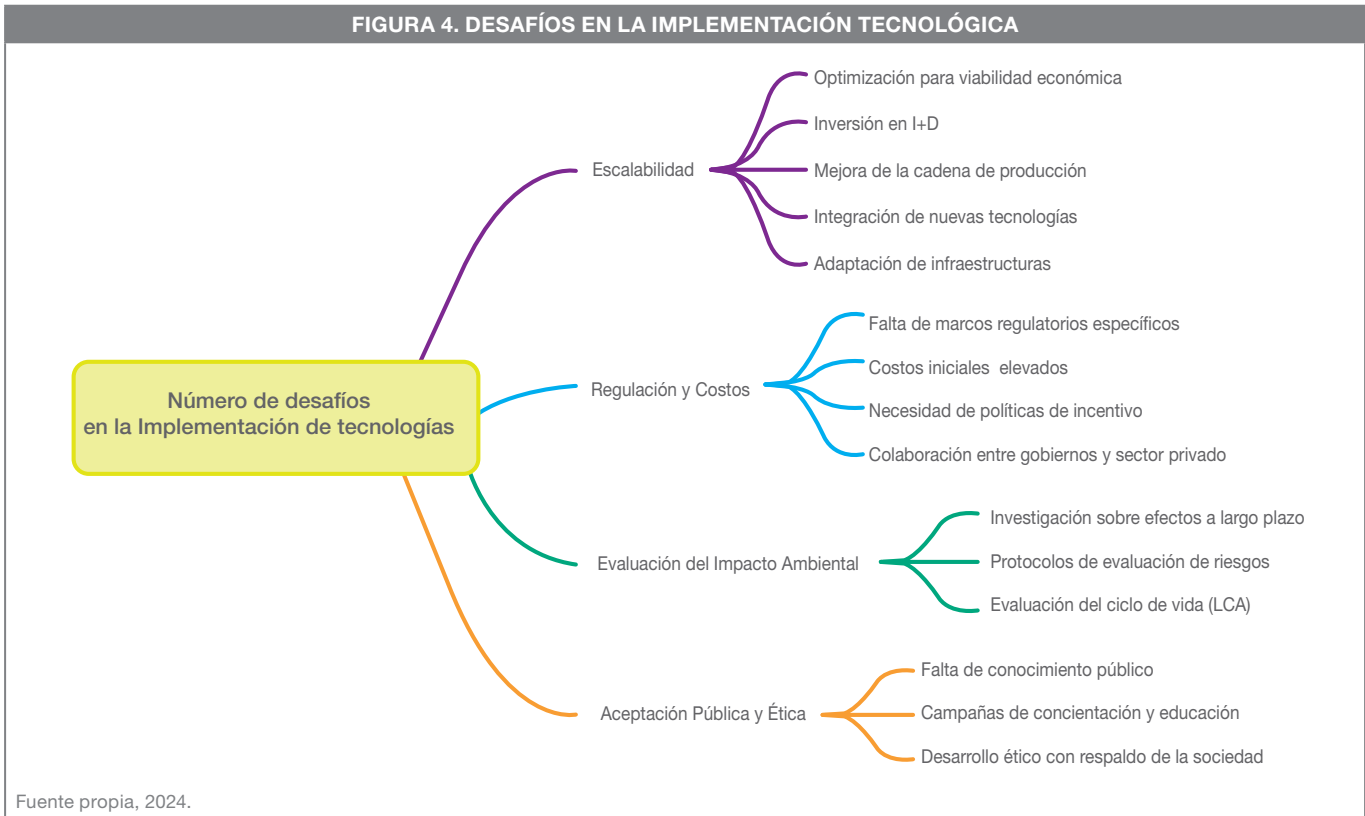
- **Sustitución de fuentes de energía convencionales:** La producción de bioenergía y combustibles verdes ayuda a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, mitigando así las emisiones de gases de efecto invernadero. El uso de tecnologías avanzadas, como celdas de combustible basadas en hidrógeno producido a partir de biomasa, se perfila como una alternativa viable a mediano plazo (Liu *et al.*, 2010).
- **Nuevos materiales de baja huella ambiental:** Los bioplásticos y biomateriales desarrollados con el apoyo de la nanotecnología permiten reducir el impacto ambiental asociado al ciclo de vida de los materiales, promoviendo una transición hacia productos más sostenibles y menos dependientes de derivados del petróleo (Camacho Elizondo *et al.*, 2022; Vega-Baudrit y Vargas Solórzano, 2024).

DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTAS TECNOLOGÍAS

A pesar de sus numerosos beneficios, la implementación de estas tecnologías presenta importantes desafíos (Figura 4):

- **Escalabilidad:** Los procesos actuales requieren mayor optimización para alcanzar viabilidad económica a gran escala, lo cual implica una inversión considerable en I+D (Investigación y desarrollo). La eficiencia en la cadena de producción debe mejorarse para competir con tecnologías tradicionales (Zhang *et al.*, 2008). Además, la integración de nuevas tecnologías y la adaptación de infraestructura existente presentan desafíos logísticos y económicos que deben superarse para alcanzar una adopción generalizada (Velázquez *et al.*, 2022; Eixenberg *et al.*, 2024).
- **Regulación y costos:** La falta de marcos regulatorios específicos para nanomateriales y biorefinería, así como los elevados costos iniciales, son barreras significativas. Se necesitan políticas que promuevan la inversión en tecnologías emergentes y regulaciones claras para la producción y uso de nanomateriales (Fadell y Garcia-Bennett, 2010). Además, la colaboración entre gobiernos, sector privado e instituciones académicas es crucial para desarrollar marcos regulatorios que incentiven la innovación sin comprometer la seguridad (Vega-Baudrit *et al.*, 2024; Vega-Baudrit *et al.*, 2023).
- **Evaluación del Impacto Ambiental:** Aún se requiere más investigación sobre los efectos potenciales de los nanomateriales a largo plazo en el medio ambiente y la salud humana. Es esencial establecer protocolos de evaluación de riesgos para prevenir posibles consecuencias negativas (Etheridge *et al.*, 2013). La evaluación del ciclo

FIGURA 4. DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN TECNOLÓGICA



de vida (LCA, por sus siglas en inglés) de los procesos y productos también es fundamental para garantizar que las soluciones desarrolladas sean realmente sostenibles y no introduzcan nuevos problemas ambientales (Hischier y Walser, 2012).

- **Aceptación pública y ética:** La aceptación pública de las nuevas tecnologías también puede ser un obstáculo. La falta de conocimiento sobre los beneficios y riesgos de la nanotecnología puede generar escepticismo. Las campañas de concientación y educación son fundamentales para fomentar la aceptación pública y para garantizar que las aplicaciones se desarrollen de manera ética y con el respaldo de la sociedad (Vega-Baudrit *et al.*, 2024).

CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS

La integración de biorrefinería, nanotecnología y energía limpia constituye un enfoque multidisciplinario fundamental para la transición hacia una economía baja en carbono y más sostenible. Estos campos

combinados ofrecen el potencial de reducir la dependencia de combustibles fósiles, impulsar la innovación en energías renovables y promover la economía circular mediante el uso eficiente de recursos naturales y la valorización de residuos.

En el futuro, la nanotecnología continuará siendo un catalizador clave en la mejora de la eficiencia y efectividad de los procesos de biorrefinería. Las aplicaciones de la nanotecnología en la producción y almacenamiento de energía también seguirán expandiéndose, con avances notables en materiales nanoestructurados, como las perovskitas, que están impulsando la eficiencia de las celdas solares. Asimismo, la investigación en supercondensadores y baterías de alta capacidad se beneficiará significativamente de los desarrollos en nanomateriales avanzados, como el grafeno y los nanotubos de carbono.

Para que estas tecnologías alcancen un impacto transformador, será necesaria una inversión sostenida en investigación y desarrollo (I+D), así como políticas gubernamentales sólidas que respalden su implementación. La cooperación internacional será esencial para compartir conocimiento, recursos y mejores prácticas

que favorezcan la adopción global de estas innovaciones. A nivel local y regional, la implementación exitosa dependerá de la capacidad de adaptar las tecnologías a las necesidades específicas y de garantizar que las infraestructuras y capacidades técnicas estén alineadas con las exigencias de estas nuevas tecnologías.

Las acciones prioritarias incluyen aumentar la inversión en I+D para mejorar la eficiencia y viabilidad económica de estas tecnologías, desarrollar políticas claras que promuevan la innovación sin comprometer la seguridad ambiental, y fomentar la educación y concienciación pública para garantizar una adopción social adecuada. La educación y la cooperación serán fundamentales para maximizar el impacto de estas tecnologías y asegurar su integración efectiva en la sociedad.

La educación y la concienciación pública desempeñan un papel fundamental en la adopción social de la nanotecnología y la biorrefinería. El compromiso con campañas educativas y la transparencia en la

comunicación sobre riesgos y beneficios contribuirán a aumentar la aceptación pública y, a su vez, acelerarán la implementación de estas tecnologías. De igual manera, es importante abordar consideraciones éticas y asegurar que las aplicaciones desarrolladas respeten los valores sociales y promuevan el bienestar humano y ambiental.

Con una inversión adecuada y políticas de apoyo, estas tecnologías tienen el potencial de contribuir a una verdadera revolución verde, abriendo nuevas oportunidades para la innovación en biotecnología, la generación de energía limpia y la mitigación del cambio climático. En última instancia, la integración de biorrefinería, nanotecnología y energía limpia permitirá avanzar hacia un modelo de producción y consumo más sostenible, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, asegurando un futuro más limpio, eficiente y equitativo para las próximas generaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., y Kougiyas, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2): 452-466. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Brennan, L., y Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae –A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2): 557-577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Camacho-Elizondo, M., Batista-Menezes, D., Mora-Bolaños, R., Vega-Baudrit, J.R. y Montes de Oca-Vásquez, G. (2022). Nanotechnology diffusion strategy: interdisciplinary teaching to primary school teachers. *Uniciencia*, 36(1): 1-13, January-December. <https://dx.doi.org/10.15359/ru.36-1.3>
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412-1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
- Chew, K. W., Yap, J. Y., Show, P. L., Suan, N. H., Juan, J. C., Ling, T. C., y Lee, D. J. (2018). Microalgae biorefinery: High value products perspectives. *Bioresource Technology*, 255: 290-300. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.006>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3): 294-306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Demirbas, A. (2009). Biofuels securing the planet's future energy needs. *Energy Conversion and Management*, 50(9): 2239-2249. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.010>
- Díaz Marcos, J., Cruz Gonzáles, B., Méndez Rojas, M., Poleri, A., Vega-Baudrit, J.R., Guimerá, G., Serena, P. (2021). El Reto de divulgar las nanotecnologías: casos de éxito. En: *Libro blanco de las nanotecnologías. Una visión ético-social ante los avances de la nanociencia y la nanotecnología* (pp. 294-323). Thomson Reuters Aranzadi.
- Eixenberger, D., Carballo-Arce, AF., Vega-Baudrit, JR. *et al.* Tropical agroindustrial biowaste revalorization through integrative biorefineries—review part II: pineapple, sugarcane and banana by-products in Costa Rica. *Biomass Conv. Bioref.* 14, 4391-4418 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02721-9>
- Etheridge, M. L., Campbell, S. A., Erdman, A. G., Haynes, C. L., Wolf, S. M., y McCullough, J. (2013). The big picture on nanomedicine: The state of investigational and approved nanomedicine products. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 9(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2012.05.013>
- Fadeel, B., y Garcia-Bennett, A. E. (2010). Better safe than sorry: Understanding the toxicological properties of inorganic nanoparticles manufactured for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 62(3), 362-374 <https://doi.org/10.1016/j.addr.2009.11.008>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P. y Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Hischier, R., y Walser, T. (2012). Life cycle assessment of engineered nanomaterials: State of the art and strategies to overcome existing gaps. *Science of the Total Environment*, 425, 271-282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.001>
- Hottle, T. A., Bilec, M. M., y Landis, A. E. (2017). Sustainability assessments of bio-based polymers. *Polymers*, 9(4), 189. <https://doi.org/10.3390/polym9040189>
- Kale, G., Kijchavengkul, T., Auras, R., Rubino, M., Selke, S. E. M., y Singh, S. P. (2007). Compostability of bioplastic packaging materials: An overview. *Macromolecular Bioscience*, 7(3), 255-277. <https://doi.org/10.1002/mabi.200600168>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Liu, C., Burghaus, U., Besenbacher, F., y Wang, Z. (2010). Preparation and characterization of nanomaterials for sustainable energy production. *ACS nano*, 4 10, 5517-26. <https://doi.org/10.1021/nn102420c>.
- Mata, T. M., Martins, A. A., y Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217-232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Mazari, S., Ali, E., Abro, R., Khan, F., Ahmed, I., Ahmed, M., Nizamuddin, S., Siddiqui, T., Hossain, N., Mubarak, N., y Shah, A. (2021). Nanomaterials: Applications, waste-handling, environmental toxicities, and future challenges – A review. *Journal of environmental chemical engineering*, 9, 105028. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105028>

- Pang, S. (2019). Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. *Biotechnology advances*, 37 4, 589-597. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.004>
- Parveen, S., Misra, R., y Sahoo, S. K. (2012). Nanoparticles: A boon to drug delivery, therapeutics, diagnostics, and imaging. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 8(2), 147-166. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2011.05.016>
- Peer, D., Karp, J. M., Hong, S., Farokhzad, O. C., Margalit, R., y Langer, R. (2007). Nanocarriers as an emerging platform for cancer therapy. *Nature Nanotechnology*, 2(12), 751-760. <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.387>
- Philp, J. C., Ritchie, R. J., y Guy, K. (2013). Biobased plastics in a bioeconomy. *Trends in Biotechnology*, 31(2), 65-67. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.11.009>
- Popp, J., Lakner, Z., Harangi-Rósz, M. y Fórián, Z. (2014). The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 559-578. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.056>
- Prasad, R., Bhattacharyya, A. y Nguyen, Q. (2017). Nanotechnology in Sustainable Agriculture: Recent Developments, Challenges, and Perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01014>
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88(10), 3411-3424. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>
- Santana Cabello, R., Vega-Baudrit, J., Zuluaga, R., y Gañán, P. (2020). Statistical Approach to Regulation of Nanotechnology: Need, Advantages and Disadvantages. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 11, 14-32. <https://doi.org/10.4236/jbnb.2020.111002>
- Serrano, E., Rus, G., y García-Martínez, J. (2009). Nanotechnology for sustainable energy. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13, 2373-2384. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.06.003>
- Sheldon, R. A., y Woodley, J. M. (2018). Role of biocatalysis in sustainable chemistry. *Chemical Reviews*, 118(2), 801-838. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00203>
- Takkellapati, S., Li, T., y Gonzalez, M. (2018). An overview of biorefinery-derived platform chemicals from a cellulose and hemicellulose biorefinery. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 1615-1630. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1568-5>
- Van den Oever, M., Molenveld, K., van der Zee, M., y Bos, H. (2017). Bio-based and biodegradable plastics: Facts and figures. *Wageningen Food & Biobased Research*, 1-66. <https://doi.org/10.18174/408350>
- Vega Baudrit, J. R.; Murrell, M.; Campos, A. y Cordero, C. (2024). Consideraciones de los desafíos legales y éticos en la ingeniería de tejidos y dispositivos médicos: perspectivas y estrategias para una innovación responsable en Life Sciences. *LOGOS*, 5(2): 72-88. <https://dspace.ulead.ac.cr/handle/123456789/281>
- Vega Baudrit, J. y Vargas-Solórzano, M. (2024). Impulso del desarrollo económico y científico a través de la nanotecnología y promoviendo la paz y la seguridad con diplomacia científica: El papel estratégico de Costa Rica en la era nanotecnológica. *LOGOS*, 5(1): 14-22
- Vega-Baudrit, J., Camacho, M., Araya, A., León, H., (2024). *Evaluation of Public Perceptions on Nanotechnology Regulation in Costa Rica*, *Science and Public Policy*. <https://doi.org/10.1093/scipol/scae042>
- Vega-Baudrit, J.R., Camacho, M., Araya, A., y Camacho, M. (2023). Regulación de la nanotecnología: garantizando la innovación responsable y segura en el avance de la ciencia y tecnología. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 10(2), 177-191. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v10i2.1581>
- Velázquez, M.E., Ferreiro-Balbuena, O.M., Batista Menezes, D., Corrales-Ureña, Y., Vega-Baudrit, J.R., Rivaldi-Chávez, J.D., (2022). Nanocellulose extracted from residual agro-industrial biomass in Paraguay: Preparation, physicochemical and morphological characterization. *Sustainability*, 14, 18. <https://doi.org/10.3390/su141811386>
- Wagner, V., Dullaart, A., Bock, A. K., y Zweck, A. (2006). The emerging nanomedicine landscape. *Nature Biotechnology*, 24(10), 1211-1217. <https://doi.org/10.1038/nbt1006-1211>
- Zhang, L., Gu, F. X., Chan, J. M., Wang, A. Z., Langer, R. S., y Farokhzad, O. C. (2008). Nanoparticles in medicine: Therapeutic applications and developments. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, 83(5), 761-769. <https://doi.org/10.1038/sj.clpt.6100400>