

Revisión Bibliográfica sobre el Desarrollo de Nuevos Materiales Adsorbentes Funcionalizados con Litio para el Almacenamiento Sostenible de Energía

Literature Review on the Development of New Lithium-Functionalized Adsorbent Materials for Sustainable Energy Storage

Zayda Vanessa Herrera Cuadrado ^[0009-0009-8158-1532]

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias. Riobamba Ecuador.

¹zayda.herrera@esPOCH.edu.ec

CITA EN APA:

Herrera Cuadrado, Z. V. (2024). Revisión Bibliográfica sobre el Desarrollo de Nuevos Materiales Adsorbentes Funcionalizados con Litio para el Almacenamiento Sostenible de Energía. *Tesla Revista Científica*, 4(1), e419.

<https://doi.org/10.55204/trc.v4i1.e419>

Recibido: 2024-01-15

Revisado: 2024-01-22 al 2023-02-11

Corregido: 2024-02-20

Aceptado: 2024-02-24

Publicado: 2024-03-06

TESLA

Revista Científica

ISSN: 2796-9320



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.

The contents of this article are under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license. The authors retain the moral and patrimonial rights of their works.

Resumen.

El incremento en la demanda de energía y los desafíos ambientales asociados al uso de combustibles fósiles han impulsado la investigación de alternativas energéticas más limpias, como el hidrógeno. Este artículo revisa las posibilidades de almacenamiento de hidrógeno utilizando materiales porosos, con un enfoque en adsorbentes obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica, particularmente de semillas de aguacate. La funcionalización de estos materiales con litio permite mejorar sus capacidades de almacenamiento, lo que los hace una opción atractiva y económica. La investigación se centra en sintetizar carbones activados mediante procesos termoquímicos y en analizar el impacto de la incorporación de litio en sus propiedades de adsorción. A pesar de los desafíos tecnológicos, como la manipulación de variables de síntesis, se concluye que los adsorbentes funcionalizados con litio representan una alternativa viable y sostenible para la transición energética. Este enfoque también contribuye a la economía circular mediante el aprovechamiento de residuos agrícolas, ayudando a resolver problemas ambientales relacionados con la disposición de estos desechos.

Palabras Clave: Almacenamiento de hidrógeno, Materiales porosos, Adsorbentes funcionalizados, Biomasa lignocelulósica, Semillas de aguacate, Energía sostenible

Abstract: The increasing demand for energy and the environmental challenges associated with the use of fossil fuels have driven the exploration of cleaner energy alternatives, such as hydrogen. This article reviews the possibilities of hydrogen storage using porous materials, focusing on adsorbents derived from lignocellulosic biomass, particularly avocado seeds. The functionalization of these materials with lithium enhances their storage capacities, making them an attractive and cost-effective option. The research focuses on synthesizing activated carbons through thermochemical processes and analyzing the impact of lithium incorporation on their adsorption properties. Despite technological challenges, such as the management of synthesis variables, it concludes that lithium-functionalized adsorbents represent a viable and sustainable alternative for the energy transition. This approach also contributes to the circular economy by utilizing agricultural waste, aiding in addressing environmental issues related to the disposal of such waste.

Keywords: Hydrogen storage, Porous materials, Functionalized adsorbents, Lignocellulosic biomass, Avocado seeds, Sustainable energy

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el incremento demográfico y la correspondiente intensificación de la demanda de insumos y servicios, así como la globalización e industrialización, han sido los causantes de un aumento significativo en la utilización de energía (Jaiswal y Sahu, 2023). Es innegable que el consumo de fuentes de energía primarias como el carbón, gas natural y petróleo ha generado diferentes desafíos tanto económicos como ambientales (Ghritlahre et al., 2023). Se estima que para el año 2060, las reservas de

combustibles fósiles disminuirán de manera notable debido a su agotamiento y respectiva sustitución por fuentes de energía renovables (Çetingürbüz y Turkyilmaz, 2023). Es conveniente aclarar que el consumo de los combustibles fósiles ha contribuido de manera significativa al calentamiento global, y al respectivo cambio climático, debido a una excesiva emisión de gases de efecto invernadero (Itas et al., 2023). Por ejemplo, un informe reciente de la Organización de la Naciones Unidas (ONU) ha revelado que la temperatura del planeta aumentó en 0.85 °C durante los últimos 130 años, siendo las tres décadas recientes donde se han presentado los cambios más significativos en el clima (Aravindan et al., 2023). Se ha concluido que las energías renovables es la alternativa para enfrentar estos problemas ambientales donde se busca generar un balance energético positivo, sustentable y sostenible (Muduli y Kale, 2023).

La utilización de hidrógeno para la generación de energía es una de las opciones más prometedoras para mitigar los efectos del cambio climático y lograr el objetivo de una reducción significativa de gases de efecto invernadero (Groll, 2023). El hidrógeno se caracteriza por una alta densidad energética y su utilización no genera prácticamente contaminación ambiental (Yong et al., 2023). Diversos estudios han concluido que la molécula de hidrógeno (H₂) es una candidata idónea como portadora eficiente de energía para alcanzar un futuro libre de emisiones de carbono (Jiang et al., 2023). Se considera que un desarrollo sustentable basado en tecnologías que aprovechen al hidrógeno es una de las rutas de acción más prometedoras para soportar el desarrollo socioeconómico de la sociedad a largo plazo (Che et al., 2023). En comparación con otras fuentes de energía, tales como el gas natural, el hidrógeno tiene un mayor contenido energético con un valor de 142 kJ/g

Aravindan et al. (2023) indica que éste es menos denso que el aire y su densidad gravimétrica es siete veces mayor que los combustibles fósiles. En general, 1 kg de hidrógeno es capaz de almacenar 2.75 veces más energía que la gasolina (Shafiei et al., 2017). A pesar de los diferentes beneficios ambientales y económicos que ofrece la generación de energía a través del hidrógeno, se tienen diferentes retos para lograr su aprovechamiento comercial e industrial a gran escala (Muthukumar et al., 2023). Uno de esos retos está asociado a su respectivo almacenamiento que es fundamental para fines de transportación.

El almacenamiento de hidrógeno se puede lograr mediante licuefacción y compresión a alta presión, almacenamiento en hidruros en estado sólido o su almacenamiento empleando materiales porosos (Karthikeyan y Kumar, 2023). En forma particular, la utilización de materiales porosos como un medio efectivo para el almacenamiento y transportación de hidrógeno es una de las alternativas más prometedoras y de bajo costo para su incorporación en la matriz energética internacional (Gao et al., 2023). Hasta el momento, los estudios que se han reportado en la literatura para almacenar hidrógeno empleando materiales porosos incluyen una gran variedad de compuestos y condiciones de operación (Chen et al., 2022). Los materiales estudiados para esta aplicación comprenden estructuras organometálicas (Rosi et al., 2003; Lu et al., 2022), materiales a base de carbono como grafeno y nanotubos de carbono (Wu et al., 2012; Hussain et al., 2019; Bi et al., 2020; Kaskun et al., 2020; Schaefer et al., 2020; Verma y Jaggi, 2022; De Rose et al., 2023), zeolitas (Rahmani et al., 2023), materiales de silicio (Muduli y Kale, 2023), entre otros. Este tipo de

materiales puede sintetizarse a diferentes condiciones (es decir, empleando una gran variedad de materias primas y tecnologías), y se ha demostrado que su funcionalización es un aspecto clave para lograr capacidades de almacenamiento significativas (Zhang et al., 2022). Dicha funcionalización modifica la estructura del material poroso creando sitios activos para adsorber una mayor cantidad del compuesto de interés, que en este caso es el hidrógeno. Por ejemplo, Çetingürbüz y Turkyilmaz (2023) reportaron la modificación de materiales de carbono, los cuales fueron obtenidos mediante la pirólisis de residuos lignocelulósicos, con ácido nítrico y cloruro de litio para incrementar su capacidad de almacenamiento de hidrógeno. Diferentes estudios teóricos también han concluido que los procesos de funcionalización con diferentes especies mejoran las propiedades de superficie de los materiales para almacenar hidrógeno (Baykasoglu et al., 2016; Zhang et al., 2022).

Una gran variedad de estudios ha demostrado que la funcionalización de materiales porosos con litio contribuye a desarrollar nuevos adsorbentes con propiedades mejoradas para el almacenamiento de hidrógeno (Baykasoglu et al., 2016; Liang et al., 2020; Marín et al., 2021; Öztu, 2021; Zhang et al., 2022). Por tanto, la utilización y aprovechamiento del litio se ha convertido en un mineral con valor estratégico en diferentes países incluyendo México. De acuerdo con estadísticas internacionales (Marmolejo-Cervantes y Garduno-Rivera, 2022), México tiene reservas potenciales que pueden ser explotadas para la recuperación y utilización de litio para fines de desarrollo de tecnología incluyendo su aplicación en la generación de energías renovables.

Por otra parte, el desarrollo de materiales porosos de bajo costo empleando residuos o materias primas renovables, que estén ampliamente disponibles y que permitan su aprovechamiento a gran escala, es atractivo desde un enfoque de economía circular. Los residuos agroindustriales son una fuente interesante de materias primas que pueden explotarse en la producción de nuevos materiales porosos, los cuales pueden modificarse con litio para lograr su eventual aplicación en el almacenamiento de hidrógeno. A lo largo de todo el territorio mexicano se cultiva una amplia gama de productos agrícolas que producen anualmente cientos de toneladas métricas de residuos (Korres et al., 2023). Estos residuos agrícolas generan un problema significativo de disposición final y su utilización para la producción y generación de fuentes alternativas de energía es una opción viable y sustentable. El aprovechamiento de esta biomasa para el desarrollo de nuevos materiales que sean útiles para consolidar el proceso de transición energética en México es un área estratégica. Es conveniente indicar que diferentes adsorbentes reportados para la captura y almacenamiento de hidrógeno han sido obtenidos de la transformación termoquímica de biomasa (Korres et al., 2023).

Se ha estimado que México, en el año 2022, produjo alrededor de 2.3 millones de toneladas de aguacate en una extensión de terreno cercana a las 234000 hectáreas. Las exportaciones de aguacate, por su parte, aportan aproximadamente 3.2 mil millones de dólares en divisas al país cada año (SIAP, 2023). Por tanto, se genera una cantidad significativa de biomasa de este producto agrícola que no es utilizada en otras cadenas productivas. Dicha biomasa residual puede ser utilizada para la preparación de nuevos

materiales incluyendo adsorbentes (Ahmad y Danish, 2022; Ibrahim et al., 2023). Los adsorbentes preparados de la biomasa del aguacate se han utilizado para la remoción de contaminantes del agua (Salomón- Negrete et al., 2018; Prabakaran et al., 2022). Sin embargo, estos materiales porosos pueden ser modificados con litio con el objetivo de desarrollar medios alternos para el almacenamiento y transportación de hidrógeno. Hasta la fecha, no hay trabajos reportados donde se preparen materiales adsorbentes a partir de la biomasa de aguacate y su respectiva funcionalización con soluciones de litio para adsorber hidrógeno. La preparación de un adsorbente efectivo y barato empleando esta ruta de síntesis requiere de un análisis detallado del efecto de las variables involucradas en el proceso para la obtención de tal adsorbente y su respectiva modificación con litio.

Por tanto, este proyecto de investigación se ha enfocado en sintetizar nuevos adsorbentes, a partir de la biomasa de aguacate, modificados con litio para su utilización en la adsorción de hidrógeno. Se reporta un estudio detallado donde se analizan diferentes condiciones de síntesis de estos materiales y sus respectivas capacidades de adsorción de hidrógeno.

El creciente y notable interés en el desarrollo sostenible, aunado al significativo incremento de la demanda de la energía a nivel global, ha impulsado una agenda de investigación y desarrollo tecnológico para reemplazar los combustibles provenientes de recursos no renovables con fuentes de energía no contaminantes. La utilización de hidrógeno como fuente de energía renovable es una de las opciones más atractivas para mitigar los impactos ambientales y contribuir a la satisfacción de las necesidades energéticas de la sociedad (Gao et al., 2023). Sin embargo, la explotación del hidrógeno en el sector energético aún presenta diversas limitaciones tecnológicas siendo su almacenamiento y transportación una de éstas. Se tiene la necesidad de desarrollar nuevos materiales adsorbentes de bajo costo y con propiedades particulares para la adsorción de hidrógeno que pueden ser utilizados como medios de almacenamiento y transporte de este energético. En particular, el uso de adsorbentes a base de carbono para el almacenamiento de este compuesto es una opción atractiva debido a que éstos pueden ser preparados a partir de residuos y sus propiedades pueden ser modificadas fácilmente (Jiang et al., 2023).

Diferentes adsorbentes para almacenar hidrógeno pueden obtenerse a partir de biomásas lignocelulósicas como residuos de madera y agrícolas, generando que su producción sea relativamente económica (Korres et al., 2023). Este tipo de adsorbentes también ofrece la ventaja de una capacidad de regeneración de sus propiedades que permite sean reutilizados varias veces antes de ser desechados (Ghritalahre et al., 2023). Estos materiales pueden modificar mediante activación química y física para desarrollar propiedades extremadamente versátiles y con una gran variedad de aplicaciones en la industria (Jaiswal y Sahu, 2023). Para el caso particular del almacenamiento de hidrógeno, la superficie de los materiales de carbono puede modificar con litio para incrementar sus propiedades de adsorción de hidrógeno (Baykasoglu et al., 2016; Öztu, 2021). No obstante, el proceso de preparación de este tipo de materiales implica la manipulación de diferentes variables que deben ser optimizadas para incrementar las propiedades de adsorción del producto final y conseguir la respectiva reducción de sus costos de síntesis.

Adicionalmente, la utilización de materias primas obtenidas de residuos que no tienen un valor comercial contribuye a mejorar la relación costo – beneficio de este tipo de adsorbentes.

Por lo cual el objetivo de la presente investigación es realizar una Revisión Bibliográfica sobre el Desarrollo de Nuevos Materiales Adsorbentes Funcionalizados con Litio para el Almacenamiento Sostenible de Energía

2. DESARROLLO

2.1 *La importancia del hidrógeno como una fuente alternativa de energía*

En las últimas décadas, se ha evidenciado un continuo aumento en la demanda global de energía por parte de la sociedad, el cual se ha basado principalmente en la utilización de fuentes no renovables (Berna-Escriche et al., 2023). Este crecimiento exponencial en la utilización de combustibles fósiles ha generado notables desequilibrios en la disponibilidad energética, creando diferentes desafíos ambientales que deben resolver para lograr un desarrollo sustentable. Ante esta situación, se debe reconocer que existe una responsabilidad social para abordar la generación y utilización de energía con un enfoque más sostenible (Zhang et al., 2023). Los avances en la generación y almacenamiento de energía renovable desempeñan un papel crucial para el desarrollo industrial y la satisfacción de las necesidades básicas de la sociedad actual (Muhammed et al., 2023). Estos avances han sido un catalizador fundamental en el desarrollo y la transformación de las capacidades energéticas a lo largo de la historia, evidenciando su impacto en el progreso continuo de la humanidad. Diferentes autores (Barzic et al., 2023; Lechón et al., 2023; Riley et al., 2023; Sharma et al., 2023; Shi y Guo, 2023) han discutido las alternativas para el almacenamiento de energía y, en particular, la importancia de desarrollar nuevos materiales para el caso del hidrógeno como un combustible sustentable que desempeñará un rol muy importante en el fortalecimiento de la matriz energética mundial.

El almacenamiento de energía ha emergido como una tecnología indispensable para satisfacer las proyecciones de demanda de la industria y sociedad en general (Zhang et al., 2023). Este concepto trasciende y se ha convertido en un elemento esencial para el desarrollo de un sistema energético avanzado que sea capaz de integrar los sistemas de producción, consumo, conversión y almacenamiento de energía, con el fin de satisfacer una variedad de demandas y necesidades, además de mantener un equilibrio entre la generación y el consumo de energía (Norouzi et al., 2023).

El hidrógeno es uno de los combustibles renovables con mayor relevancia para lograr la meta de minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. La utilización de este combustible presenta retos en términos de su almacenamiento para fines de transportación y utilización. Por tanto, diversos estudios se han centrado en desarrollar nuevos materiales que permitan el almacenamiento y transportación de este compuesto (Grubel et al., 2020; AlZohbi et al., 2023; Priyadharsini et al., 2023; Rinaldi et al., 2023; Weikl y Peschel, 2023). En esencia, los materiales óptimos para su utilización y aprovechamiento en el almacenamiento y transportación de hidrógeno deben exhibir una alta capacidad de carga y un proceso reversible a condiciones de operación ambiente (Kaewmaraya et al., 2023). Estas dos

características son los principales retos para lograr una aplicación comercial de este tipo de materiales. Por tanto, en el presente capítulo se discute el estado del arte asociado al desarrollo de nuevos materiales para el almacenamiento de hidrógeno como fuente de energía.

2.2 *Hidrógeno y sus propiedades como un energético sustentable*

El interés en impulsar el desarrollo sostenible a nivel global, tanto para satisfacer las necesidades de la industria como de la sociedad en su conjunto, ha aumentado significativamente durante las últimas décadas. Las características limpias, confiables y potencialmente sustentables de la utilización de hidrógeno como vector energético han impulsado una importante agenda de investigación y desarrollo tecnológico alrededor de éste.

Este energético se está convirtiendo cada vez más en un impulsor esencial de una transición multisectorial hacia una economía baja en carbono y fundamentada en fuentes de energía renovable (Falcone et al., 2021). Por ejemplo, la implementación a nivel mundial de vehículos equipados con pilas de combustible que utilizan hidrógeno podría desempeñar un papel considerable para atenuar los desafíos relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire que el planeta enfrenta en la actualidad (Chen et al., 2022).

El interés en el almacenamiento de hidrógeno se centra en su aplicación como combustible alternativo que permita sustituir a los combustibles fósiles mitigando sus respectivos impactos ambientales. Este químico presenta una excepcional densidad energética por unidad de masa, alcanzando los 143 MJ/kg que equivalen a tres veces la capacidad energética de la gasolina por unidad de masa, es decir, 44.4 MJ/kg (Isidro-Ortega et al., 2017). Este gas es el más liviano y es reconocido por su elevado poder calorífico durante la combustión y su naturaleza no contaminante. Éste se puede emplear como materia prima en diversos campos como la petroquímica, microelectrónica, síntesis química, producción de polímeros, así como en el procesamiento metalúrgico (Zhang et al., 2023).

Las razones que respaldan la posibilidad de implementar fuentes de energía basadas en el hidrógeno, en el mediano y largo plazo, incluyen (Zhang et al., 2023):

- a. La reacción de combustión del hidrógeno es reconocida por su producción exclusiva de agua, un subproducto limpio que no genera contaminación. Este atributo es un distintivo como una fuente energética que contribuirá significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la preservación ambiental.
- b. La energía derivada del hidrógeno forma parte de las fuentes renovables y puede ser generada mediante otras fuentes naturales de energía tales como la solar y eólica.
- c. La energía del hidrógeno se caracteriza por su elevado poder calorífico ya que se genera 1.25×10^6 kJ de calor una vez que se quema 1 kg de hidrógeno, el cual es equivalente a 3 kg de gasolina o 4.5 kg de coque. Es decir, se requiere una menor cantidad de hidrógeno para alcanzar el mismo kilometraje que con el diésel o gasolina, disminuyendo de manera notable el consumo de combustible.

Por otra parte, la noción de una "economía del hidrógeno" está estrechamente relacionada con la capacidad de este químico para actuar como el principal portador de energía y su rol para reemplazar, total o parcialmente, a las tradicionales fuentes de energía no renovables. Esencialmente, este concepto se refiere a una economía que anticipa la transición de fuentes de energía que dependen en su mayoría de los combustibles fósiles hacia una infraestructura energética basada en un uso extensivo del hidrógeno. El objetivo fundamental detrás de esta transformación es establecer un sistema energético más eficiente, sostenible y limpio, tal como ha sido sugerido por varios expertos (Muhammed et al., 2023).

Con fines ilustrativos, la Tabla 2.1 incluye una comparación detallada de las características del hidrógeno con respecto a las fuentes de energía convencionales. El contenido de esta tabla es útil para visualizar la eficiencia y potencialidad de la economía basada en el hidrógeno en diferentes áreas de aplicación.

En la literatura especializada se presenta una clasificación de las fuentes de producción de hidrógeno según colores, como se muestra en la Figura 2.1. En particular, el hidrógeno *turquesa* se obtiene a través de la descomposición térmica del gas natural, un proceso conocido como pirólisis o craqueo del metano, con el carbono sólido como subproducto, y donde el metano se transforma en hidrógeno. El hidrógeno *marrón* se produce por la gasificación de combustibles a base de carbón. El hidrógeno *gris* se genera a partir del proceso llamado reformado de metano, aunque la producción de éste conlleva la emisión de 10 toneladas de dióxido de carbono por cada tonelada de producto. El hidrógeno *azul* se obtiene mediante combustibles fósiles, similar al hidrógeno *gris* pero incorporando técnicas de captura y almacenamiento de carbono para reducir las emisiones. Finalmente, el hidrógeno *verde* comúnmente se produce utilizando fuentes de energía totalmente renovables, como la energía eólica o solar, con una huella de carbono reducida, seguido por un procedimiento conocido como electrólisis del agua (Osman et al., 2022; Muhammed et al., 2023).

Tabla 2.1 Comparación de las características del hidrógeno con respecto a combustibles convencionales (Amirthan y Perera, 2022; Muhammed et al., 2022; Muhammed et al., 2023).

Propiedades	Hidrógeno	Metano	Petróleo/ gasolina	Diésel
Densidad de energía, MJ/kg	120	55.6	46.40	45.60
Volumen ocupado por unidad de masa, L/kg	1123.6	1522.1	1.3-1.4	1.0-1.1
Volumen ocupado por unidad de energía, L/MJ	100	25	0.03	0.026
Temperatura de ignición de aire, °C	585	634	280	210
Energía de ignición, MJ	0.02	.0.3	0.8	20
Calor de vaporación, kJ/kg	444	577	348.9	232.6

Rango de inflamabilidad (% volumen en el aire)	4-75	5-15	1-8	0.6-7.5
--	------	------	-----	---------

El suministro eficiente y suficiente de hidrógeno se ha convertido en una prioridad especialmente para aplicaciones como el desarrollo de las pilas de combustible (Bernardo et al., 2020). Este interés ha llevado a una serie de investigaciones centradas en la implementación de métodos específicos para purificar el hidrógeno. Esta tarea ha dado lugar a la siguiente clasificación de métodos de purificación: químicos, físicos y difusión selectiva (Aasadnia et al., 2021). Este tipo de estudios ha permitido abordar los desafíos asociados con la pureza y la eficiencia en la producción de hidrógeno, allanando el camino para su aplicación en diversas áreas tecnológicas.

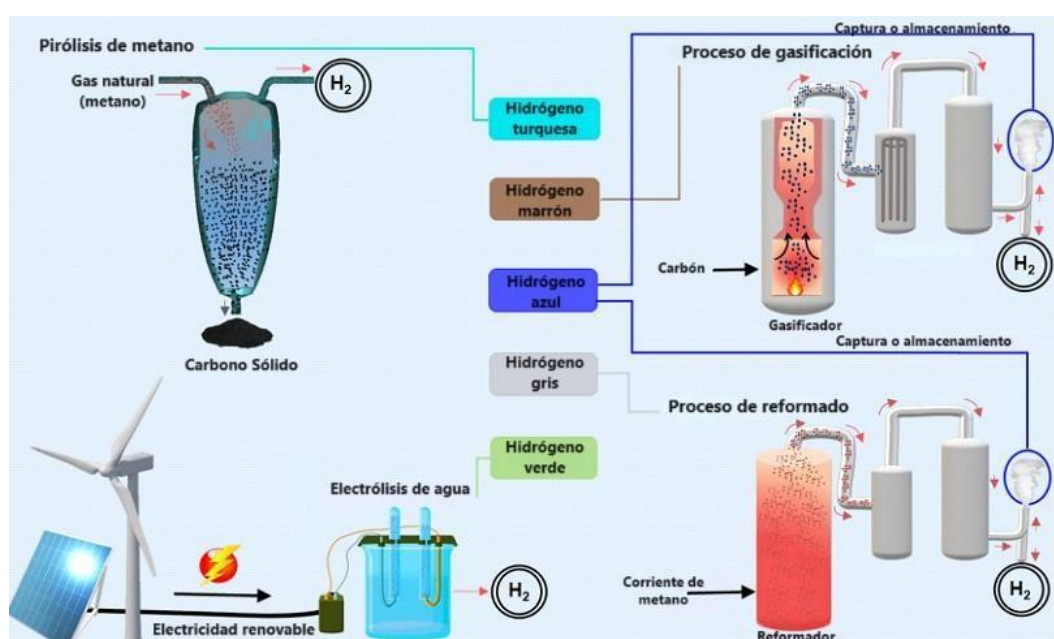


Figura 2.1 Fuentes de producción del hidrógeno y su clasificación por colores (Osman et al., 2022).

El hidrógeno, al igual que la electricidad, es un portador de energía y, en consecuencia, su almacenamiento es fundamental para un uso selectivo y minimizar su desperdicio (Osman et al., 2022). No obstante, la complejidad del almacenamiento de hidrógeno radica en sus propiedades físicas y químicas, ver Tabla 2.2. El punto de ebullición de este energético es 20.39 K a 1 atmósfera, el cual es un valor equiparable, desde un punto de vista de operación industrial, tanto a su temperatura crítica (33.18 K) como a su punto de fusión (13.95 K). Estas propiedades termodinámicas extremas complican su manipulación y almacenamiento, siendo elementos críticos para tener en cuenta durante su aplicación en diversos campostecnológicos.

Sin duda, uno de los principales retos para la incorporación del hidrógeno en la matriz energética mundial es el desarrollo de estrategias que permitan su almacenamiento (en condiciones de operación ambientales) facilitando así su respectiva manipulación, transportación y utilización. En la siguiente sección se aborda brevemente las diferentes alternativas y retos tecnológicos para el almacenamiento de

hidrógeno.

Tabla 2.2 Propiedades termodinámicas del hidrógeno (Nowotny et al., 2005).

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Peso molecular	2.016 g/mol
Punto de fusión	13.95 K
Punto de ebullición (1 atm)	20.39 K
Temperatura crítica	33.18 K
Presión crítica	13.13 bar

2.3 *Almacenamiento de hidrógeno*

Las alternativas tecnológicas para el almacenamiento del hidrógeno se categorizan en dos grupos principales: almacenamiento físico y almacenamiento químico. La Figura 2.2 muestra esta clasificación. El almacenamiento de tipo químico implica la utilización de hidruros metálicos y celdas de combustibles; mientras que el almacenamiento físico se divide en compresión, compresión criogénica, licuefacción y adsorción (Genovese y Fragiacomio, 2021; Tarasov et al., 2021; Ramírez-Vidal et al., 2023; Xia et al., 2023; Yang et al., 2023; Zhang et al., 2023). A continuación, se presenta una breve descripción de estas estrategias de almacenamiento de hidrógeno.

El almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros metálicos implica la interacción de aleaciones entre metales e hidrógeno a temperaturas extremadamente elevadas (Barthelemy et al., 2016). Este proceso conduce a la formación de hidruros metálicos donde el hidrógeno, al entrar en contacto con el metal, se disocia en moléculas y libera átomos que pueden ocupar los espacios intersticiales dentro de la red cristalina metálica. En esencia, este método se basa en la capacidad del hidrógeno para formar enlaces con el metal, generando así una estructura de hidruro estable que actúa como reserva de almacenamiento de éste. Dicha técnica presenta una alta densidad de almacenamiento, aunque requiere temperaturas extremadamente altas para el proceso de formación de los hidruros metálicos, lo cual limita su aplicación paraciertas condiciones (White et al., 2006; Muhammed et al., 2023).

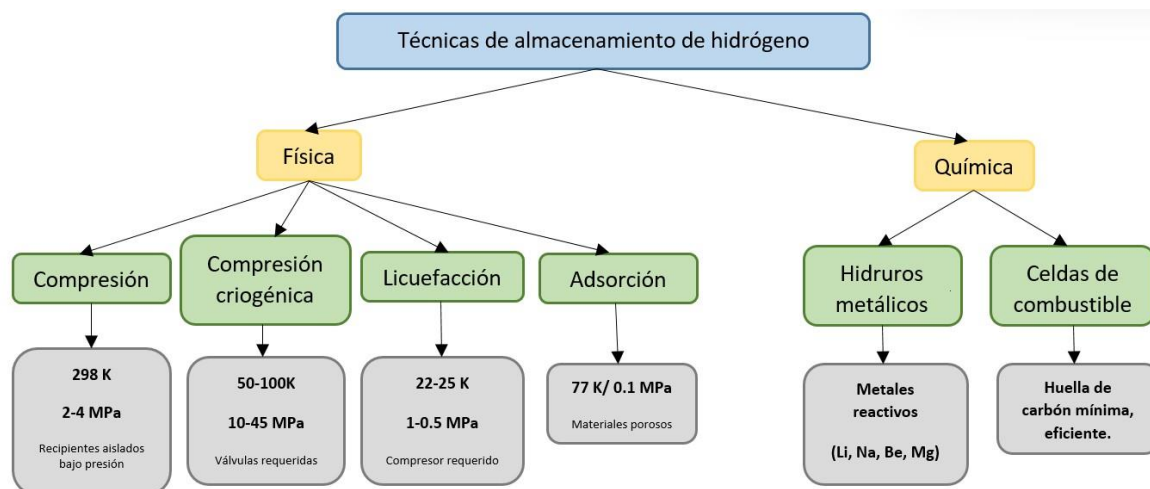


Figura 2.2 Alternativas tecnológicas para el almacenamiento de hidrógeno (White et al., 2006).

El almacenamiento de hidrógeno mediante celdas de combustible es un componente esencial en los vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) donde se integra con un conjunto de baterías auxiliares, un motor eléctrico y tanques de almacenamiento de hidrógeno a alta presión. Este sistema propulsor es emblemático de este tipo de vehículos, ya que emplea las celdas de combustible para generar electricidad a partir del hidrógeno almacenado, alimentando así el motor eléctrico que impulsa el vehículo. Este enfoque híbrido, que combina tanto las celdas de combustible como las baterías, permite una mayor eficiencia y autonomía en comparación con los vehículos eléctricos tradicionales (Ahluwalia et al., 2018; Camacho et al., 2022).

Por otra parte, el almacenamiento de hidrógeno en la forma de gas comprimido se fundamenta en la retención de hidrógeno en contenedores a presiones extremadamente elevadas, siendo una técnica frecuente en entornos industriales (Abe et al., 2019). Este método de almacenamiento tiene aplicaciones significativas en la industria petrolera, donde se emplea en procesos como el hidroprocesamiento e hidrocrackeo. Para este tipo de aplicaciones, las densidades tanto volumétricas como gravimétricas experimentan un aumento gradual hasta alcanzar niveles aceptables. En general, se requiere comprimir el hidrógeno a presiones altas, generalmente entre 70 y 100 MPa, para cumplir con los requerimientos del almacenamiento. Este tipo de almacenamiento ha demostrado ser valioso en aplicaciones que exigen altos estándares de presión y densidad energética (Zhou, 2005; Zheng et al., 2012).

En la industria automotriz actual, los vehículos *Hyundai Nexo* y *Toyota Mirai* destacan como innovaciones que emplean pilas de combustible alimentadas por hidrógeno. Este tipo de vehículo son más ligeros que sus contrapartes disponibles en el mercado. Estos vehículos integran capacidades de almacenamiento de 156 - 142.2 L de hidrógeno, permitiendo alcanzar una notable autonomía de alrededor de 650 km. Esta tecnología refleja un avance significativo en la adopción de la energía de hidrógeno en la movilidad, ofreciendo una combinación notable de eficiencia y rendimiento para los usuarios preocupados por la sostenibilidad (Amirthan y Perera, 2022).

El almacenamiento criogénico de hidrógeno, en comparación con su contraparte comprimida, ofrece

múltiples beneficios, especialmente en términos de eficiencia gravimétrica. La densidad del hidrógeno en estado líquido alcanza el valor de 71 g/L, superando la densidad del hidrógeno gaseoso a 700 bar, que se limita a 42 g/L. Sin embargo, es fundamental destacar que se requiere un incremento del 30% o más de energía para lograr que el hidrógeno alcance su estado líquido, el cual ocurre a una temperatura por debajo de su punto de ebullición, es decir, $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Yanxing et al., 2019). Una de las aplicaciones más importantes de este tipo de almacenamiento es la automatización aérea y espacial donde el requerimiento de densidad energética es mayor.

El almacenamiento por licuefacción es el proceso donde el hidrógeno pasa de estado gaseoso a estado líquido por medio de modificaciones tanto de temperatura como de presión. Para lograr este cambio de estado termodinámico se necesitan condiciones criogénicas debido al punto de ebullición del hidrógeno, el cual es $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zhang et al., 2023). La principal desventaja de esta estrategia de almacenamiento es el costo asociado para lograr estas condiciones de condensación.

El método de almacenamiento de hidrógeno por adsorción se ha visualizado como una solución viable y rentable, en términos económico para un escenario de operación de largo plazo, gracias a su notable capacidad de almacenamiento (McWhorter et al., 2011). Este método ofrece una capacidad superior de almacenamiento y destaca por su alta seguridad en comparación con otras alternativas. Un aspecto relevante de este proceso es que las condiciones de operación, tanto en términos de temperatura como de presión, se mantienen en rangos moderados. Un punto crucial de este tipo de almacenamiento es su reversibilidad, lo cual facilita en gran medida su uso y aplicación práctica. Su rápida cinética de almacenamiento y eficiente reversibilidad son otras ventajas que han sido señaladas en la literatura (Prabhukhot et al., 2016). Este método puede ofrecer una solución valiosa para los desafíos de almacenamiento de hidrógeno, brindando así una combinación de capacidad, seguridad y practicidad en su aplicación.

La adsorción de hidrógeno mediante fisisorción, la cual se basa en fuerzas de van der Waals, implica una unión mediante fuerzas relativamente débiles con una energía de unión estimada entre 4 - 10 kJ/mol (Niaz et al., 2015). Esta característica posibilita una gestión más sencilla y ofrece una reversibilidad destacada, permitiendo una rápida cinética entre la adsorción y la desorción del hidrógeno en el material sólido utilizado para su almacenamiento.

El almacenamiento de hidrógeno en materiales porosos se puede realizar en forma efectiva a una temperatura de 77 K donde se alcanzan capacidades de almacenamiento bastante significativas (Rivard et al., 2019; Muhammed et al., 2023). Los materiales utilizados para el almacenamiento de hidrógeno mediante adsorción son usualmente sólidos muy porosos con estructuras y composiciones muy diversas (Conte et al., 2023; Goel et al., 2023; Jia et al., 2023). Con fines ilustrativos, la Tabla 2.3 muestra una relación de diferentes adsorbentes que han sido utilizados para el almacenamiento de hidrógeno y sus respectivas capacidades de almacenamiento a 77 K. Estos incluyen una gran diversidad de materiales que varían desde estructuras orgánico-metálicas hasta polímeros de microporosidad intrínseca, estructuras

orgánicas covalentes, zeolitas y carbones activados (Rosi et al., 2003; Huang et al., 2010; Sun y Webley, 2010; Sumida et al., 2011; Liu et al., 2014; Blankenship et al, 2017; Kato y Nishide, 2018; Bouaziza et al., 2019; Rivard et al., 2019). Las propiedades de adsorción de hidrógeno de estos materiales dependen de las materias primas utilizadas en la síntesis de la estructura porosa, sus condiciones de preparación, la utilización de químicos adicionales para funcionalizar/modificar su química de superficie y, por supuesto, las condiciones de operación para el almacenamiento del energético.

Tabla 2.3 Relación de diferentes adsorbentes que han sido utilizados para el almacenamiento de hidrógeno y sus respectivas capacidades de adsorción a 77 K.

<i>Material</i>	<i>Capacidad de adsorción de hidrógeno, wt%</i>	<i>Cita</i>
Estructura metal-orgánica MOF-5	2.5	(Rosi et al., 2003)
Carbón activado obtenido con hidróxido de potasio	2.89	(Huang et al., 2010)
Carbón activado obtenido con hidróxido de potasio y ácido fosforoso	2.0	(Sun y Webley, 2010)
MOF dopado con Magnesio	2.20	(Sumida et al., 2011)
Carbón activado preparado con elote como precursor	2.85	(Liu et al., 2014)
Carbón activado preparado con celulosa como precursor	3.9	(Blankenship et al, 2017)
Polímero poliestireno hiperreticulado preparado a partir de poli(clorometil estireno-co-divinilbenceno)	1.5	(Kato y Nishide, 2018)
Zeolita X dopada con magnesio	1.5	(Bouaziza et al., 2019)

El presente proyecto de investigación se enfocó en la aplicación de carbones activados para el proceso de adsorción de hidrógeno. Los carbones activados son materiales potenciales para el almacenamiento de hidrógeno y su efectividad puede ser mejorada mediante la introducción de grupos funcionales específicos en su superficie (Blankenship et al, 2017; Kato y Nishide, 2018). Los estudios reportados en la literatura han indicado que diferentes especies como cloruro de zinc (Yusuf et al., 2019), hidróxido de potasio (Arshada et al., 2016; Ezaty et al., 2021), níquel (Carraro et al., 2014), paladio (Díaz et al., 2010), ruterio (Hsin y Wen, 2004), y silicio (Jaiswal y Sahu, 2023) son útiles para incrementar las propiedades de almacenamiento de hidrógeno de los carbones activados. En particular, el tratamiento de superficies de carbono con soluciones de litio puede aumentar los sitios activos disponibles para la adsorción y generar una mayor capacidad de almacenamiento de hidrógeno (Lee y Yushin, 2021; Asenbauer et al., 2023; Jaiswal y Sahu, 2023; Jiang et al., 2023; Öztu, 2023; Yong et al., 2023; Zhang et al., 2023). A la fecha, los materiales modificados con litio para la adsorción de hidrógeno incluyen carbones activados, zeolitas, polímeros, compuestos orgánico-metálicos, entre otros (Usman, 2022; Nagar et al., 2023). Estas investigaciones han proporcionado evidencia sustancial acerca de las mejoras que implica la incorporación de litio en la superficie de materiales adsorbentes para el almacenamiento efectivo de

hidrógeno. Por tanto, este tipo de funcionalización abre nuevas vías para potenciar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno en los materiales porosos como los carbones activados.

En esta dirección, la investigación de Zhang et al. (2022) ha validado el impacto positivo de la modificación de materiales de carbono empleando litio para el almacenamiento de hidrógeno. Los resultados de este estudio indicaron mejoras considerables en la capacidad de almacenamiento del material probado. El litio permite generar interacciones efectivas con el hidrógeno y, por tanto, se puede utilizar para desarrollar diversos materiales destinados al almacenamiento de éste (Marín et al., 2021;

Asenbauer et al., 2023; Jaiswal y Sahu, 2023; Jiang et al., 2023; Öztu, 2023; Yong et al., 2023; Zhang et al., 2023). Por ejemplo, se ha reportado el uso de nanotubos de carbono dopados con litio para el almacenamiento de hidrógeno (Baykasoglu et al., 2016), así como la modificación con litio de nanoesferas de carbono magnetizadas (Liang et al., 2020). Öztu (2021) estudió la funcionalización de membranas de grafeno con litio observando un aumento significativo en su capacidad de almacenamiento de hidrógeno y alcanzando un 21% en peso a 77 K y 10 bar y un 4% en peso a 298 K y 100 bar. Liu et al. (2022) sintetizaron un compuesto utilizando óxido de grafeno y el material MIL-100(Fe) dopado con litio donde se demostraron mejoras notables en la adsorción de hidrógeno a temperatura ambiente.

2.4 Utilización de biomasa lignocelulósicas como precursores en la síntesis de adsorbentes para el almacenamiento de hidrógeno

La biomasa es considerada como la fuente natural renovable más rica de carbono. Dicha biomasa puede utilizarse como precursor para la síntesis de materiales de carbono para su aplicación en diferentes campos (Rehman et al., 2022). Generalmente, los componentes principales de la biomasa son celulosa, hemicelulosa y lignina, con porcentajes despreciables de sustancias inorgánicas mineralizadas, ver Figura 2.3 (Houston et al., 2016; Yogalakshmi et al., 2022). La distribución de estos compuestos depende de la naturaleza y fuente de la biomasa (Gupta et al., 2022).

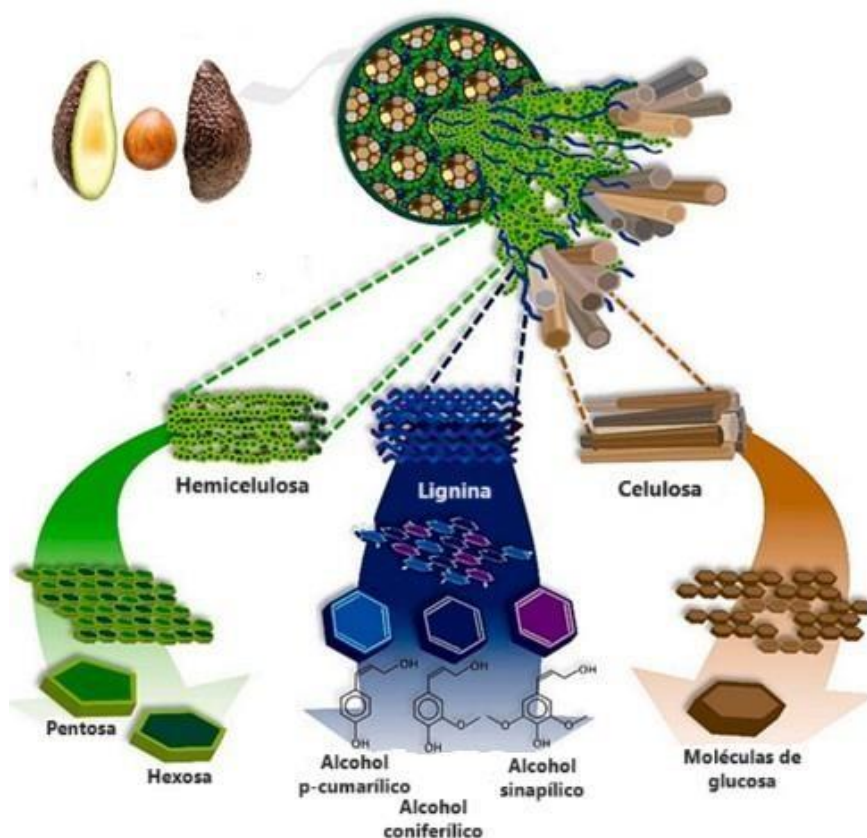


Figura 2.3 Composición estructural de la biomasa lignocelulósica (Osman et al., 2022).

Durante el tratamiento térmico de la biomasa para la síntesis de adsorbentes, se liberan moléculas volátiles y vapores de agua además de ocurrir la descomposición del contenido de polímeros naturales. Para el caso particular de los materiales lignocelulósicos, éstos se caracterizan por la presencia predominante de celulosa, la cual constituye una proporción significativa de su contenido. La celulosa cuando se somete a un tratamiento térmico inicia su despolimerización a temperaturas cercanas a los 250 °C (Liu et al., 2015). Este proceso lleva a la ruptura gradual de los enlaces glucosídicos, ocasionando la formación progresiva de alquitrán y la creación de un material de tonalidad oscura (Patwardhan et al., 2011; Zhang y Gao, 2012). La hemicelulosa es el segundo biopolímero que constituye a la biomasa vegetal. La hemicelulosa inicia su despolimerización en un tratamiento térmico a 150 – 350 °C (Pengy Wu, 2010; Peters, 2011). El biopolímero lignina es el tercero en abundancia y posee una estructura química compleja. La variedad de grupos funcionales confiere una alta polaridad a las moléculas de lignina, lo que genera una estructura altamente diversificada y un mecanismo de descomposición pirolítica sumamente complejo en un rango de temperatura de 250 – 500°C (Wei et al., 2013). La transformación termoquímica de materiales lignocelulósicos da lugar a estructuras de carbono que se caracterizan por contener una variedad de grupos funcionales distintivos: –COOH, –NH₂, –OH. Las características finales de la superficie de carbono pueden variar según el método de tratamiento térmico empleado (es decir, pirólisis, carbonización, carbonización hidrotermal, gasificación) (Rehman et al., 2022). Es importante destacar que cada tipo de biomasa, debido a sus particulares características y composición, muestra un comportamiento singular durante el proceso de

formación del material a base de carbono. Estas variaciones en la materia prima (es decir, biomasa) influyen significativamente en las propiedades y la composición del material final, lo que a su vez afecta su aplicación y desempeño en distintos contextos de uso.

En México, existe una amplia variedad de residuos agroindustriales que pueden ser utilizados como materias primas del tipo lignocelulósico para la obtención de nuevos materiales que pueden ser usados como adsorbentes (Robledo-Narváez et al., 2013; Macías- Almazán et al., 2020; Licona-Aguilar et al., 2022). Uno de los residuos más destacados y relevantes por su volumen de generación a nivel nacional es el aguacate.

El aguacate, científicamente conocido como *Persea americana*, se distingue por su exclusiva combinación de lípidos, vitaminas, minerales, folatos, potasio y fibra. Dependiendo del tamaño y la variedad, su contenido calórico oscila entre 140 y 228 kcal (Ortiz et al., 2018; Bhuyan et al., 2019). Este fruto es originario de Centroamérica, en especial de Guatemala y México, y se cultiva en zonas tropicales y subtropicales alrededor del mundo (Prance, 2003).

México ostenta el liderazgo en la producción mundial de aguacate contribuyendo con aproximadamente el 38% del volumen total (Gutiérrez et al., 2010). En particular, el estado de Michoacán destaca como la principal región productora. En 2019, la producción mexicana de aguacate alcanzó las 2,307,971 toneladas con un aumento del 5.7% en comparación con el año anterior y una superficie de cultivo estimada de 231,028 hectáreas (SIAP, 2020).

A pesar de ser un producto altamente valorado, solo se utiliza la pulpa del aguacate, dejando desaprovechadas alrededor de 230,797 toneladas de semillas, las cuales representan aproximadamente 10 - 13% del fruto. Por tanto, el consumo del aguacate genera un gran desperdicio de material lignocelulósico que es desaprovechado en México (Elizalde González et al., 2007; Barbosa-Martín et al., 2016).

En diversos estudios se ha documentado el empleo de las semillas de aguacate como materia prima para la preparación de adsorbentes que han sido utilizados para procesos de separación tales como la remoción de contaminantes del agua (Salomón-Negrete et al., 2018; Dhaouadi et al., 2021; Ahmad y Danish, 2022). La utilización de estas semillas para la obtención de nuevos materiales para el almacenamiento de hidrógeno aportaría valor a estos residuos agrícolas y ayudaría a resolver los desafíos asociados a su disposición final (Domínguez et al., 2014). A la fecha, no existen antecedentes de la utilización de este residuo para la preparación de nuevos materiales que puedan utilizarse en el almacenamiento y transportación de hidrógeno. Por tanto, la semilla de aguacate emerge como un posible precursor para la potencial producción de adsorbentes que puedan ser utilizados en la captura de hidrógeno, un compuesto de alto valor en el contexto actual. Los resultados del presente proyecto de investigación buscan contribuir a esa dirección.

3. CONCLUSIONES

El desarrollo de nuevos materiales adsorbentes a partir de residuos agroindustriales, como las semillas de aguacate, representa una alternativa viable para el almacenamiento de hidrógeno. La

funcionalización de estos materiales con soluciones de litio mejora sus propiedades de adsorción, lo que permite optimizar su eficiencia en aplicaciones energéticas, contribuyendo a un futuro energético más sostenible.

El almacenamiento de hidrógeno en materiales porosos funcionalizados con litio ofrece una solución prometedora para la transición energética hacia fuentes más limpias y renovables. Los avances en la manipulación de variables de síntesis y la incorporación de residuos agrícolas como precursores son esenciales para el desarrollo de adsorbentes de bajo costo y alto rendimiento

FINANCIACIÓN

Los autores deben declarar la fuente de financiación de su investigación, estas pueden ser organizaciones gubernamentales, universidades, centros de investigación, becas, proyectos aprobados entre otros. Por otra parte, si la investigación no tuvo financiamiento también debe indicarlos

CONFLICTO DE INTERESES

Los Autores declaran si existen o no conflicto de intereses con su investigación

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://credit.niso.org/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

<i>Participar activamente en:</i>	<i>Autor 1.</i>
<i>Conceptualización</i>	X
<i>Análisis formal</i>	X
<i>Adquisición de fondos</i>	X
<i>Investigación</i>	X
<i>Metodología</i>	X
<i>Administración del proyecto</i>	X
<i>Recursos</i>	X
<i>Redacción –borrador original</i>	X
<i>Redacción –revisión y edición</i>	X
<i>La discusión de los resultados</i>	X
<i>Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.</i>	X

REFERENCIAS

- Aasadnia, M., Mehrpooya, M., & Ghorbani. B. (2021). A novel integrated structure for hydrogen purification using the cryogenic method. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123872>.
- Ahmad, T., & Danish, M. (2022). A review of avocado waste-derived adsorbents: Characterizations, adsorption characteristics, and surface mechanism. *Chemosphere*, 296, 134036. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134036>.
- Bai, Y., Yue, H., Wang, J., Shen, B., Sun, S., Wang, S., Wang, H., Li, X., Xu, Z., Zhang, R., & Wei, F. (2020). Super-durable ultralong carbon nanotubes. *Science*, 369(6507), 1104-1106. <https://doi.org/10.1126/science.aay5220>
- Bernardo, G., Araújo, T., Silva-Lopes, T., Sousa, J., & Mendes. A. (2020). Recent advances in membrane technologies for hydrogen purification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(12), 7313-7338. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.162>.
- Chen, D., Zhou, Z., Feng, C., Lv, W., Wei, Z., Zhang, K., Lin, Wu, S., Lei, T., Guo, X., Zhu, G., Jian, X., Xiong, J., Traversa, E., Dou, S., & He. W. (2019). An upgraded lithium ion battery based on a polymeric separator incorporated with anode active materials. *Advanced Energy Materials*, 9 (1803627) 1-11. <https://doi.org/10.1002/aenm.201803627>.
- Gupta, M., Savla, N., Pandit, C., Pandit, S., Gupta, P., Pant, M., Khilari, S., Kumar, Y., Agarwal, D., Nair, R., Thomas, D., & Thakur, V. (2022). Use of biomass-derived biochar in wastewater treatment and power production: A promising solution for a sustainable environment. *Science of the Total Environment* 825, 153892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153892>.

- Li, B., Jin, X., Lin, J., & Chen, Z. (2018). Green reduction of graphene oxide by sugarcane bagasse extract and its application for the removal of cadmium in aqueous solution. *Journal of Cleaner Production*, 189, 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.018>.
- Li, Z., Wang, W., Liang, X., Wang, J., Xu, Y., & Li, W. (2023). Fiber swelling to improve cycle performance of paper-based separator for lithium-ion batteries application. *Journal of Energy Chemistry*, 79, 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2022.08.030>.
- Nagar, R., Srivastava, S., Hudson, S., Amaya, S., Tannae, A., Sharma, M., Achayalingam, R., Sonkaria, S., Khare, V., & Srinivasan, S. (2023). Recent developments in state-of-the-art hydrogen energy technologies—Review of hydrogen storage materials. *Solar Compass*, 5, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2023.100033>.
- Ramirez-Vidal, P., Sdanghi, G., Celzard, A., & Fierro, V. (2022). High hydrogen release by cryo-adsorption and compression on porous materials. *International Journal of Hydrogen Energy* 47, 8892-8915. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.235>.
- Tarasov, B., Fursikov, P., Volodin, A., Bocharnikov, M., Shimkus, Y., Kashin, A., Yartys, V., Chidziva, S., Pasupathi, S., & Lototsky, M. (2021). Metal hydride hydrogen storage and compression systems for energy storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 13647-13657. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.085>.
- Yanxing, Z., Maoqiong, G., Yuan, Z., Xueqiang, D., & Jun, S. (2019). Thermodynamics analysis of hydrogen storage based on compressed gaseous hydrogen, liquid hydrogen and cryo-compressed hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(31), 16833-16840. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.207>.
- Zhou, L. (2005). Progress and problems in hydrogen storage methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(4), 395-408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.005>.
- Aasadnia, V., Mehrpooya, M., & Ghorbani, B. (2021). A novel integrated structure for hydrogen purification using the cryogenic method. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123872>.
- Ahmad, T., & Danish, M. (2022). A review of avocado waste-derived adsorbents: Characterizations, adsorption characteristics, and surface mechanism. *Chemosphere* 296, 134036. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134036>.