



# Aerogeles a partir de nanocelulosa: Aplicaciones en la agroindustria

## Aerogels from nanocellulose: Applications in agroindustry

Jonathan G. Lescano <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

\* Autor corresponsal: J. G. Lescano [ [mayerjona07@gmail.com](mailto:mayerjona07@gmail.com) | <https://orcid.org/0009-0000-8871-7986> ]

### Resumen

Los aerogeles a base de nanocelulosa han emergido como materiales prometedores en diversas aplicaciones industriales debido a sus propiedades excepcionales, como alta porosidad, baja densidad y capacidad de absorción. Estos materiales, derivados del biopolímero más abundante en la Tierra, la celulosa, presentan ventajas significativas en la búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes. La nanocelulosa, obtenida a través de métodos avanzados de síntesis, ofrece una combinación única de resistencia mecánica, biodegradabilidad y compatibilidad ambiental. Este artículo revisa las aplicaciones de los aerogeles de nanocelulosa en la agroindustria, destacando su potencial en el embalaje de alimentos, control de humedad y filtración de agua, entre otros. Además, se exploran los desafíos asociados con su producción a gran escala y las perspectivas futuras en la integración de estos materiales en sistemas industriales y tecnológicos más amplios. Con un enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia, los aerogeles de nanocelulosa representan una innovación clave en la ciencia de los materiales y sus aplicaciones en sectores críticos.

**Palabras clave:** aerogel; nanocelulosa; capacidad de absorción; conductividad térmica; residuos agroindustriales; celulosa.

### Abstract

Aerogels based on nanocellulose have emerged as promising materials for various industrial applications due to their exceptional properties, including high porosity, low density, and absorption capacity. These materials, derived from the most abundant biopolymer on Earth, cellulose, offer significant advantages in the quest for sustainable and efficient solutions. Nanocellulose, produced through advanced synthesis methods, provides a unique combination of mechanical strength, biodegradability, and environmental compatibility. This article reviews the applications of nanocellulose aerogels in the agro-industry, highlighting their potential in food packaging, moisture control, and water filtration, among others. Additionally, the challenges associated with large-scale production and future prospects for integrating these materials into broader industrial and technological systems are explored. With a focus on sustainability and efficiency, nanocellulose aerogels represent a key innovation in material science and its applications in critical sectors.

**Keywords:** aerogel; nanocellulose; absorption capacity; thermal conductivity; agro-industrial waste; cellulose.



## 1. Introducción

La ciencia de los materiales enfrenta una serie de desafíos críticos que son fundamentales para el avance tecnológico y la sostenibilidad ambiental. Entre estos, se destacan la necesidad de desarrollar materiales sostenibles y reciclables, abordar la escasez de recursos como los metales raros, y mejorar las tecnologías de reciclaje (Fagnani et al., 2022). Además, la innovación en nuevos materiales con propiedades avanzadas, como los superconductores a temperatura ambiente y los nanomateriales, sigue siendo un área de intensa investigación (Podgornik, 2023). Los materiales para almacenamiento y conversión de energía son esenciales para el futuro de las energías renovables y los vehículos eléctricos (Yuan & Shen, 2022). La biocompatibilidad y la toxicidad de nanomateriales presentan preocupaciones de seguridad y salud, mientras que los desafíos en la escalabilidad de la producción y la integración de nuevos materiales en sistemas existentes son barreras para su adopción comercial (Rae-Dupree, 2023). Finalmente, la reducción de costos de producción, el desarrollo de materiales multifuncionales, y la mejora en la resistencia, durabilidad, y propiedades térmicas y eléctricas son áreas clave que requieren soluciones innovadoras para impulsar el progreso en múltiples industrias. Ante estas problemáticas, los aerogeles emergen como una solución prometedora, ofreciendo avances significativos hacia la sostenibilidad y eficiencia en múltiples aplicaciones.

Los aerogeles son de materiales ultraligeros y porosos con una densidad extremadamente baja y una alta superficie específica. Inicialmente, los aerogeles se sintetizaron a partir de geles de sílice, pero con el tiempo, se expandieron a otros materiales como carbono, óxidos metálicos, polímeros orgánicos, nanoestructuras del carbono, entre otras (Lopes et al., 2023a; Sharma et al., 2023; Zheng et al., 2020; Zhou et al., 2021). Los aerogeles exhiben una combinación de propiedades extraordinarias a diferencia de sus geles homólogos, incluyendo baja conductividad térmica, alta porosidad, alta superficie específica, alta capacidad de absorción y baja densidad (Azadi & Dinari, 2023; Guild et al., 2016; Karamikamkar et al., 2023). Además, el desarrollo de aerogeles híbridos y compuestos ha ampliado aún más su aplicabilidad, permitiendo la incorporación de características adicionales como conductividad eléctrica y mejor estabilidad mecánica (Liu et al., 2022). Estas propiedades han permitido que tenga muchas aplicaciones en diversas industrias y se esté buscando formas de mejorarlos para cada aplicación específica. Las propiedades de los aerogeles dependen principalmente del material con el que están hechos, pero el método de extracción del solvente influye. Por

ejemplo, los aerogeles secos por evaporación subcrítica tienden a tener una estructura más densa y rígida que los secos por liofilización (Donèlienè et al., 2022).

Además, la incorporación de polímeros orgánicos, catalizadores o agentes de entrecruzamiento puede mejorar la resistencia mecánica de los aerogeles sin comprometer significativamente otras propiedades como la baja densidad o la alta porosidad (Aycock, 2017). Entre todos los tipos de aerogeles, destaca los hechos por celulosa, por su biodisponibilidad, sustentabilidad y su producción eco amigable (Tofanica et al., 2022).

La celulosa es el biopolímero más abundante de la tierra, ya que es el principal componente de las plantas. Por lo que es muy utilizado en la industria por su capacidad de ser un recurso versátil y renovable (Rashid & Dutta, 2022). Al ser tan utilizado en la industria, existen grandes cantidades de desechos industriales que presentan este polímero, por lo que se ha buscado diferentes alternativas para reutilizarlos en la industria del papel, industria textil, agroindustria e industrias de envases (Araújo et al., 2019). Todas estas características hacen que la celulosa sea un componente valioso en el desarrollo de productos sustentables y ecológicos en la agroindustria (Picot-Allain & Emmambux, 2023).

Sin embargo, trabajar con celulosa presenta varios desafíos significativos que limitan su aplicabilidad y eficiencia en diversas industrias. La celulosa, debido a su estructura cristalina y la extensa formación de enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares, es insoluble en la mayoría de los solventes orgánicos y acuosos, lo que complica su procesamiento y modificación química. Su alta higroscopicidad puede afectar la estabilidad dimensional y las propiedades mecánicas de los productos derivados (Seiler et al., 2020). La obtención de celulosa pura a partir de biomasa vegetal también implica procesos intensivos en energía y recursos, generando residuos y emisiones que pueden tener impactos ambientales negativos. Estos problemas resaltan la necesidad de desarrollar métodos más eficientes y sostenibles para el procesamiento y funcionalización de la celulosa, así como estrategias para mejorar su compatibilidad con matrices poliméricas y otros materiales (Clauser et al., 2022).

La nanocelulosa surgió como una alternativa innovadora en respuesta a la necesidad de materiales más sostenibles y de alto rendimiento en diversas aplicaciones industriales y tecnológicas. Su desarrollo se debe a los avances en la nanotecnología y en los métodos de procesamiento de la celulosa a escala nanométrica (Norfarhana et al., 2024). A principios del siglo XXI, los investigadores comenzaron a explorar

formas de descomponer las fibras de celulosa en sus componentes más pequeños, los nanocristales y las nanofibrillas, utilizando métodos mecánicos, químicos y enzimáticos. Uno de los principales impulsores del interés en la nanocelulosa fue su extraordinaria combinación de propiedades físicas y químicas. La nanocelulosa exhibe una alta resistencia mecánica, una gran superficie específica, y propiedades únicas como transparencia y biocompatibilidad, que superan significativamente a las de la celulosa convencional (Masruchin, 2023). Estas propiedades abrieron nuevas posibilidades para su aplicación en campos tan diversos como la biomedicina, la electrónica, los materiales, y la industria alimentaria.

El reciente interés en la sostenibilidad y los materiales ecológicos ha llevado al desarrollo de aerogeles basados en biopolímeros, como la nanocelulosa, que combinan las ventajas de los aerogeles tradicionales con la biodegradabilidad y la compatibilidad ambiental. Estos aerogeles abren nuevas oportunidades en industrias como la agroindustria, donde pueden desempeñar roles clave en la conservación de alimentos, la filtración de agua y el embalaje sostenible (Araby et al., 2016).

## 2. Nanocelulosa

Los métodos de síntesis de nanocelulosa han evolucionado significativamente para obtener materiales celulósicos a escala nanométrica, aprovechando tanto tratamientos mecánicos como químicos (Xu et al., 2023). En términos mecánicos, la nanocelulosa se puede obtener mediante técnicas de desfibrilación, donde la celulosa se desintegra mecánicamente a través de homogeneizadores de alta presión o microfluidizadores, separando fibras en nanofibrillas o nanocristales de celulosa. Por otro lado, los métodos químicos incluyen la hidrólisis ácida, que utiliza ácidos fuertes para descomponer la celulosa en nanocristales, y la oxidación selectiva, que modifica químicamente la celulosa para producir nanofibrillas. Además, algunos microorganismos presentan enzimas que permiten la formación de esta como subproducto de su ciclo de vida (Fernandes et al., 2023). Estos enfoques permiten ajustar las propiedades de la nanocelulosa, como la morfología y la cristalinidad, según las aplicaciones específicas en nanotecnología, biomateriales y productos avanzados para la industria (Uşurelu & Panaitescu, 2023).

### 2.1. Nanofibras de Celulosa

Las nanofibras de celulosa (CNFs) son estructuras alargadas y delgadas obtenidas mediante métodos mecánicos o enzimáticos a partir de fuentes lignocelulósicas como la madera, el algodón o el bagazo de caña de azúcar. Estos métodos permiten

desfibrilar las fibras de celulosa a escala nanométrica, preservando en gran medida la estructura cristalina y las propiedades mecánicas de la celulosa natural (Carter et al., 2021)

Las nanofibras de celulosa exhiben propiedades destacadas como alta resistencia mecánica, flexibilidad, biocompatibilidad y biodegradabilidad. Estas características las hacen ideales para una variedad de aplicaciones avanzadas, desde refuerzos en nanocompuestos poliméricos hasta materiales de envasado sostenibles, ingeniería de tejidos y dispositivos biomédicos. El desarrollo continuo de métodos de síntesis eficientes y sostenibles para nanofibras de celulosa promete expandir aún más su utilidad en diversas industrias tecnológicas y ambientales (Syafri et al., 2022).

### 2.2. Nanocristales de Celulosa

Los nanocristales de celulosa (CNCs) son nanoestructuras cristalinas obtenidas mediante métodos de descomposición química o mecánica de materiales lignocelulósicos como la madera, el algodón o el bagazo de caña de azúcar. Estas diminutas partículas, que poseen dimensiones nanométricas en al menos una de sus dimensiones, exhiben propiedades físicas y químicas únicas que las hacen altamente deseables para diversas aplicaciones tecnológicas y biomédicas (Ma et al., 2023).

La obtención de CNCs generalmente involucra la hidrólisis ácida, donde la celulosa se descompone mediante ácidos fuertes como el ácido sulfúrico, seguido de un proceso de purificación para aislar los cristales de celulosa pura. Alternativamente, la hidrólisis enzimática emplea enzimas celulolíticas para una descomposición más selectiva y controlada, preservando mejor la estructura cristalina de la celulosa. Las propiedades destacadas de los CNCs incluyen su alta rigidez y resistencia mecánica, transparencia óptica, y biocompatibilidad, lo que los convierte en materiales ideales para aplicaciones como refuerzo en nanocompuestos, desarrollo de materiales biomédicos avanzados y fabricación de películas barrera en empaques sostenibles (Calvo et al., 2023).

### 2.3. Aerogeles

En artículos de investigación, en esta sección se deben detallar los procedimientos, técnicas, instrumentos, etc. que permitieron conseguir los objetivos del estudio. Los aerogeles son materiales porosos de baja densidad y alta porosidad, conocidos por su estructura tridimensional única y propiedades físicas excepcionales. La obtención de aerogeles involucra métodos especializados que permiten la creación de redes sólidas con una estructura interna altamente

porosa Uno de los métodos principales para obtener aerogeles es la gelificación seguida de la eliminación del líquido del gel, lo que resulta en un sólido con una estructura abierta y porosa. Este proceso puede realizarse mediante la síntesis de geles a partir de precursores como soluciones coloidales o polímeros, seguido de la eliminación del solvente a través de métodos de secado supercrítico o subcrítico.

El secado supercrítico implica la sustitución del líquido por un fluido supercrítico, manteniendo la estructura del gel intacta mientras se elimina el solvente, resultando en un aerogel con una estructura tridimensional porosa y una baja densidad aparente. Por otro lado, el secado subcrítico implica la eliminación del líquido por evaporación a temperaturas y presiones controladas, permitiendo la formación de aerogeles más densos, pero aun altamente porosos. Estos métodos no solo permiten la manipulación de las propiedades estructurales y superficiales del aerogel, sino que también facilitan su aplicación en una amplia gama de campos, incluyendo aislamiento térmico, catálisis, absorción de contaminantes y aplicaciones biomédicas avanzadas (Budtova et al., 2020).

### 3. Aplicaciones de los aerogeles

#### 3.1. Embalaje para alimentos

Los aerogeles ofrecen aplicaciones prometedoras en el embalaje de alimentos debido a sus propiedades únicas que pueden mejorar la conservación y seguridad de los productos alimenticios. Su estructura porosa y ligera les permite actuar como excelentes materiales de embalaje para mantener la frescura y proteger contra daños físicos durante el transporte y almacenamiento de alimentos perecederos (Abdullah et al., 2023). Los aerogeles pueden utilizarse como materiales de embalaje innovadores que proporcionan propiedades de aislamiento térmico efectivas, ayudando a mantener la temperatura adecuada de los alimentos sensibles al calor o al frío. Además, su capacidad para absorber y retener líquidos en pequeñas cantidades puede ser aprovechada para controlar la humedad y prolongar la vida útil de los productos alimenticios. Por ejemplo, aerogeles de sílice modificados pueden ser aplicados como revestimientos protectores que ofrecen barreras contra la humedad y agentes contaminantes externos, preservando así la calidad y seguridad de los alimentos envasados (Zhou et al., 2021). Estas características hacen que los aerogeles sean candidatos ideales para innovaciones en embalajes activos e inteligentes, donde pueden integrarse con sensores para monitorear condiciones ambientales y garantizar la frescura y seguridad alimentaria a lo largo de la cadena de suministro.

#### 3.2. Control de humedad en almacenamiento

Los aerogeles tienen aplicaciones significativas en el control de humedad durante el almacenamiento debido a sus propiedades únicas que permiten la absorción, retención y regulación precisa de la humedad en diversos entornos (Aragón-Gutierrez et al., 2020). Su estructura altamente porosa y su capacidad para interactuar con moléculas de agua los convierten en materiales ideales para mantener condiciones ambientales óptimas en diferentes aplicaciones industriales y comerciales.

#### 3.3. Filtración y purificación del agua

La alta área superficial de los aerogeles facilita la adsorción de contaminantes, mientras que su estructura porosa permite un flujo de agua eficiente sin comprometer la capacidad de purificación. Además, los aerogeles pueden ser funcionalizados con grupos químicos específicos para mejorar selectivamente la adsorción de contaminantes específicos, como pesticidas o productos farmacéuticos, contribuyendo así a la eliminación de sustancias nocivas del suministro de agua. Estas características hacen que los aerogeles sean ideales para aplicaciones en sistemas de tratamiento de agua tanto a pequeña escala, como en dispositivos de filtración portátiles, como a gran escala, en plantas de tratamiento municipal e industrial, donde pueden mejorar significativamente la calidad del agua y cumplir con estándares regulatorios más estrictos (Lorevice et al., 2023).

#### 3.4. Aislamientos Térmicos en Invernaderos

Los aerogeles han mostrado un potencial significativo en aplicaciones de aislamiento térmico en invernaderos, donde juegan un papel crucial en la mejora de la eficiencia energética y el control climático. Estos materiales ultraligeros y altamente porosos poseen propiedades termoaislantes excepcionales debido a su baja conductividad térmica y capacidad para atrapar aire en su estructura nanoporosa (Lopes et al., 2023b). Al integrarse en sistemas de invernaderos, los aerogeles pueden ayudar a minimizar las pérdidas de calor durante las estaciones frías y reducir la entrada de calor excesivo en épocas de alta radiación solar. Esto no solo optimiza las condiciones ambientales para el cultivo de plantas al mantener temperaturas estables, sino que también reduce el consumo energético necesario para la calefacción y refrigeración de los invernaderos (Melitã & Croitoru, 2019).

Además de su capacidad para aislar térmicamente, los aerogeles ofrecen otras ventajas significativas en aplicaciones de invernaderos. Su ligereza permite una fácil integración en estructuras existentes sin

aumentar significativamente la carga estructural, mientras que su durabilidad y resistencia a la compresión garantizan una vida útil prolongada y mantenimiento reducido. Los aerogeles también pueden adaptarse para controlar la humedad relativa dentro del invernadero, ayudando a mantener condiciones óptimas de crecimiento para diferentes cultivos y mitigando problemas asociados con la condensación y la humedad excesiva (Balaji et al., 2022).

#### 4. Tendencias y Perspectivas

La celulosa es un material renovable que ha surgido como una alternativa “ecológica” para los materiales derivados de los biocombustibles, sin embargo, su extracción tiene muchas variables lo que permite la continua investigación y desarrollo de nuevos métodos para reducir los residuos peligrosos y contaminantes, que los métodos convencionales forman, además de las grandes cantidades de energía que se necesitan para poner a funcionar los sistemas de extracción. Por otro lado, la nanocelulosa, tiene una gran variedad de aplicaciones y métodos más verdes, pero existe una gran dificultad de producirlo a gran escala, por su alto costo de producción y manipulación. Por último, los aerogeles son una alternativa perfecta a las necesidades de la ciencia de los materiales, por sus aplicaciones en la industria. Como observamos en la Figura 1 (a) el binomio que más se repite es empaque de alimentos, el cual es una aplicación que se lleva investigando exhaustivamente en los últimos tiempos. Por sus propiedades, como la capacidad de controlar la humedad, su aislamiento

térmico y su baja densidad lo hacen parecer el empaque perfecto. Sin embargo, su alto costo impide su producción a gran escala. El siguiente termino es el de aguas residuales, lo cual concuerda con las aplicaciones que se le está dando a los aerogeles en la absorción y adsorción de compuestos no deseados en líquidos, por su alta porosidad y su alta area superficial. En la Figura 1(b) se observa que las características de los aerogeles que destacan por su impacto e importancia son el aislamiento térmico y su capacidad absorbente.

#### 5. Conclusiones

Los aerogeles de nanocelulosa han demostrado ser materiales avanzados para el embalaje de alimentos y el control de humedad, ofreciendo soluciones sostenibles y eficaces. Su capacidad para mantener la frescura de los alimentos y regular la humedad en diversas condiciones ambientales resalta su potencial para mejorar la conservación y seguridad alimentaria, así como para optimizar la eficiencia en el almacenamiento y transporte de productos perecederos. Los aerogeles presentan propiedades excepcionales para la filtración y purificación del agua, debido a su alta porosidad y capacidad de adsorción. Estas características permiten la eliminación eficaz de contaminantes, mejorando significativamente la calidad del agua potable y de aguas residuales. La funcionalización específica de los aerogeles para adsorber selectivamente diferentes tipos de contaminantes posiciona a estos materiales como una opción prometedora para enfrentar desafíos ambientales relacionados con el suministro y tratamiento de agua.

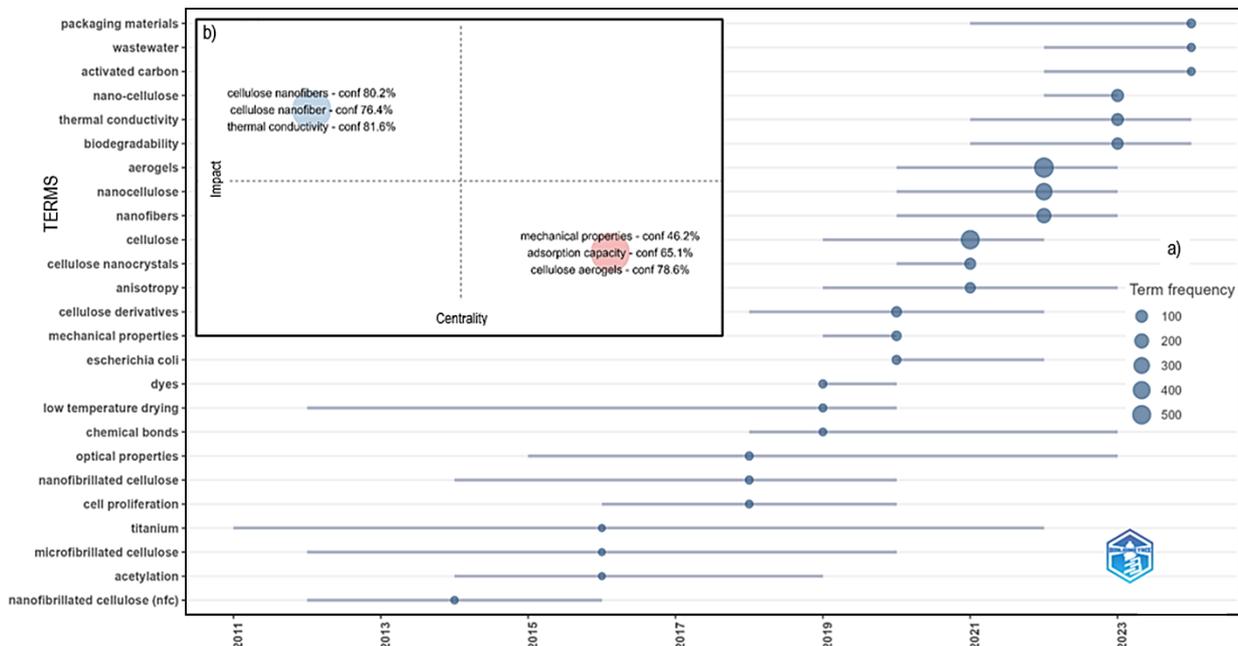


Figura 1. a) Grafico de los términos que más se repiten en artículos de aplicaciones de aerogeles de nanocelulosa a través del tiempo (2010-2024) b) Clúster de los biterminos que más se repiten según el impacto e importancia tiene.

En el ámbito agrícola, los aerogeles han mostrado su eficacia en aplicaciones de aislamiento térmico en invernaderos. Su capacidad para mantener temperaturas estables y mejorar la retención de agua en el suelo contribuye a la eficiencia energética y a la sostenibilidad agrícola. Además, los fertilizantes de liberación controlada basados en aerogeles optimizan la entrega de nutrientes, reducen la contaminación ambiental y mejoran la productividad agrícola, destacando su potencial para transformar prácticas agrícolas hacia una mayor sostenibilidad y eficiencia.

## Referencias bibliográficas

- Abdullah, Zou, Y., Farooq, S., Walayat, N., Zhang, H., Faieta, M., Pittia, P., & Huang, Q. (2023). Bio-aerogels: Fabrication, properties and food applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(24), 6687-6709. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2037504>
- Araby, S., Qiu, A., Wang, R., Zhao, Z., Wang, C.-H., & Ma, J. (2016). Aerogels based on carbon nanomaterials. *Journal of Materials Science*, 51(20), 9157-9189. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0141-z>
- Aragón-Gutiérrez, A., Arrieta, M. P., López-González, M., Fernández-García, M., & López, D. (2020). Hybrid Biocomposites Based on Poly(Lactic Acid) and Silica Aerogel for Food Packaging Applications. *Materials*, 13(21), 4910. <https://doi.org/10.3390/ma13214910>
- Araújo, D. J. C., Vilarinho, M. C. L. G., & Machado, A. V. (2019). Agroindustrial residues as cellulose source for food packaging applications. En C. Vilarinho, F. Castro, M. Gonçalves, & A. L. Fernando (Eds.), *Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities III* (1.ª ed., pp. 217-223). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429289798-35>
- Aycock, R. (2017). Comparing the Bulk Modulus of Aerogels Obtained Through Different Formulas. *Research & Development in Material Science*, 2(3). <https://doi.org/10.31031/RDMS.2017.02.000537>
- Azadi, E., & Dinari, M. (2023). Green Synthesis, Characterization, and Properties of Carbon Aerogels. En Shahid Ul Islam & C. M. Hussain (Eds.), *ACS Symposium Series* (Vol. 1441, pp. 1-23). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2023-1441.ch001>
- Balaji, D., Sivalingam, S., Bhuvaneshwari, V., Amarnath, V., Adithya, J., Balavignesh, V., & Ganesh Surya, R. (2022). Aerogels as alternatives for thermal insulation in buildings – A comparative teeny review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 5371-5377. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.541>
- Budtova, T., Aguilera, D. A., Beluns, S., Berglund, L., Chartier, C., Espinosa, E., Gaidukovs, S., Klimek-Kopyra, A., Kmita, A., Lachowicz, D., Liebner, F., Platnieks, O., Rodríguez, A., Tinoco Navarro, L. K., Zou, F., & Buwalda, S. J. (2020). Biorefinery Approach for Aerogels. *Polymers*, 12(12), 2779. <https://doi.org/10.3390/polym12122779>
- Calvo, V., Álvarez Sánchez, M. Á., Güemes, L., Martínez-Barón, C., Baulde, S., Criado, A., González-Domínguez, J. M., Maser, W. K., & Benito, A. M. (2023). Preparation of Cellulose Nanocrystals: Controlling the Crystalline Type by One-Pot Acid Hydrolysis. *ACS Macro Letters*, 12(2), 152-158. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00705>
- Carter, N., Grant, I., Dewey, M., Bourque, M., & Neivandt, D. J. (2021). Production and Characterization of Cellulose Nanofiber Slurries and Sheets for Biomedical Applications. *Frontiers in Nanotechnology*, 3, 729743. <https://doi.org/10.3389/fnano.2021.729743>
- Clauser, N. M., Felissia, F. F., Area, M. C., & Vallejos, M. E. (2022). Technological and economic barriers of industrial-scale production of nanocellulose. En *Green Nanomaterials for Industrial Applications* (pp. 21-39). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823296-5.00015-0>
- Donélienè, J., Fataraitè-Urbonienè, E., Danchova, N., Gutzov, S., & Ulbikas, J. (2022). The Influence of the Precursor's Nature and Drying Conditions on the Structure, Morphology, and Thermal Properties of TiO<sub>2</sub> Aerogels. *Gels*, 8(7), 422. <https://doi.org/10.3390/gels8070422>
- Fagnani, D. E., Jehanno, C., Sardon, H., & McNeil, A. J. (2022). Sustainable Green Polymerizations and End-of-Life Treatment of Polymers. *Macromolecular Rapid Communications*, 43(13), 2200446. <https://doi.org/10.1002/marc.202200446>
- Fernandes, A., Cruz-Lopes, L., Esteves, B., & Evtuguin, D. (2023). Nanotechnology Applied to Cellulosic Materials. *Materials*, 16(8), 3104. <https://doi.org/10.3390/ma16083104>
- Guild, M. D., García-Chocano, V. M., Sánchez-Dehesa, J., Martin, T. P., Calvo, D. C., & Orris, G. J. (2016). Aerogel as a Soft Acoustic Metamaterial for Airborne Sound. *Physical Review Applied*, 5(3), 034012. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.5.034012>
- Karamikamkar, S., Yalcintas, E. P., Haghniaz, R., De Barros, N. R., Mecwan, M., Nasiri, R., Davoodi, E., Nasrollahi, F., Erdem, A., Kang, H., Lee, J., Zhu, Y., Ahadian, S., Jucaud, V., Maleki, H., Dokmeci, M. R., Kim, H., & Khademhosseini, A. (2023). Aerogel-Based Biomaterials for Biomedical Applications: From Fabrication Methods to Disease-Targeting Applications. *Advanced Science*, 10(23), 2204681. <https://doi.org/10.1002/advs.202204681>
- Liu, P., Chen, X., Li, Y., Cheng, P., Tang, Z., Lv, J., Aftab, W., & Wang, G. (2022). Aerogels Meet Phase Change Materials: Fundamentals, Advances, and Beyond. *ACS Nano*, 16(10), 15586-15626. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c05067>
- Lopes, W. C., Brito, F. M., Neto, F. E., Araújo, A. R., Leite, R. C., Viana, V. G. F., Silva-Filho, E. C., & Silva, D. A. (2023a). Development of a New Clay-Based Aerogel Composite from Ball Clay from Piauí, Brazil and Polysaccharides. *Polymers*, 15(11), 2412. <https://doi.org/10.3390/polym15112412>
- Lopes, W. C., Brito, F. M., Neto, F. E., Araújo, A. R., Leite, R. C., Viana, V. G. F., Silva-Filho, E. C., & Silva, D. A. (2023b). Development of a New Clay-Based Aerogel Composite from Ball Clay from Piauí, Brazil and Polysaccharides. *Polymers*, 15(11), 2412. <https://doi.org/10.3390/polym15112412>
- Lorevice, M. V., Claro, P. I. C., Aleixo, N. A., Martins, L. S., Maia, M. T., Oliveira, A. P. S., Martinez, D. S. T., & Gouveia, R. F. (2023). Designing 3D fractal morphology of eco-friendly nanocellulose-based composite aerogels for water remediation. *Chemical Engineering Journal*, 462, 142166. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142166>
- Ma, L., Xu, Y., Chen, J., Dong, C., & Pang, Z. (2023). Preparation of Cellulose Nanocrystals by Synergistic Action of Ionic Liquid and Recyclable Solid Acid under Mild Conditions. *Molecules*, 28(7), 3070. <https://doi.org/10.3390/molecules28073070>
- Masruchin, N. (2023). Nanocellulose, The Origin of Natural Reinforcement in Advanced Biocomposites. *Journal of Fibers and Polymer Composites*, 2(1). <https://doi.org/10.55043/jfpc.v2i1.82>
- Meliță, L., & Croitoru, C. (2019). Aerogel, a high performance material for thermal insulation—A brief overview of the building applications. *E3S Web of Conferences*, 111, 06069. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911106069>
- Norfarhana, A. S., Ilyas, R. A., Nazrin, A., Sapuan, S. M., Syafiq, R. M. O., Khoo, P. S., Nordin, A. H., Omran, A. A. B., Midhun, D. C. D., Hawanis, H. S. N., Sari, N. H., Mahardika, M., Asrofi, M., & Abrial, H. (2024). Nanocellulose: From biosources to nanofiber and their applications. *Physical Sciences Reviews*, 9(7), 2419-2444. <https://doi.org/10.1515/psr-2022-0008>

- Picot-Allain, M. C. N., & Emmambux, M. N. (2023). Isolation, Characterization, and Application of Nanocellulose from Agro-industrial By-products: A Review. *Food Reviews International*, 39(2), 941-969. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1928689>
- Podgornik, B. (2023). Advanced materials and research for the green future. *Materiali in tehnologije*, 57(1). <https://doi.org/10.17222/mit.2022.717>
- Rae-Dupree, J. (2023). Biocompatible Materials Offer Sustainability and Enhanced Design. *IEEE Pulse*, 14(2), 11-14. <https://doi.org/10.1109/MPULS.2023.3269744>
- Rashid, S., & Dutta, H. (2022). Industrial Applications of Cellulose Extracted from Agricultural and Food Industry Wastes. En Shahid-ul-Islam, A. H. Shalla, & S. A. Khan (Eds.), *Handbook of Biomass Valorization for Industrial Applications* (1.<sup>st</sup> ed., pp. 417-443). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119818816.ch18>
- Seiler, E. R. D., Takeoka, Y., Rikukawa, M., & Yoshizawa-Fujita, M. (2020). Development of a novel cellulose solvent based on pyrrolidinium hydroxide and reliable solubility analysis. *RSC Advances*, 10(19), 11475-11480. <https://doi.org/10.1039/D0RA01486A>
- Sharma, J., Sheikh, J., & Behera, B. K. (2023). Aerogel composites and blankets with embedded fibrous material by ambient drying: Reviewing their production, characteristics, and potential applications. *Drying Technology*, 41(6), 915-947. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2162918>
- Syafri, E., Jamaluddin, Sari, N. H., Mahardika, M., Amanda, P., & Ilyas, R. A. (2022). Isolation and characterization of cellulose nanofibers from *Agave gigantea* by chemical-mechanical treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 200, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12>
- Tofanica, B.-M., Belosinschi, D., & Volf, I. (2022). Gels, Aerogels and Hydrogels: A Challenge for the Cellulose-Based Product Industries. *Gels*, 8(8), 497. <https://doi.org/10.3390/gels8080497>
- Uşurelu, C. D., & Panaitescu, D. M. (2023). Nanocellulose/Nanodiamond Hybrids: A Review. *Macromol*, 3(2), 400-420. <https://doi.org/10.3390/macromol3020024>
- Xu, K., Chen, Y., Du, G., & Wang, S. (2023). Preparation, Properties, and Advanced Functional Applications of Nanocellulose. En G. Du & X. Zhou (Eds.), *Wood Industry—Past, Present and Future Outlook*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105807>
- Yuan, L., & Shen, Y. (2022). A Review of Research on Recyclable Polymer Materials. *MATEC Web of Conferences*, 363, 01025. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236301025>
- Zheng, L., Zhang, S., Ying, Z., Liu, J., Zhou, Y., & Chen, F. (2020). Engineering of Aerogel-Based Biomaterials for Biomedical Applications. *International Journal of Nanomedicine*, Volume 15, 2363-2378. <https://doi.org/10.2147/IJN.S238005>
- Zhou, W., Fang, J., Tang, S., Wu, Z., & Wang, X. (2021). 3D-Printed Nanocellulose-Based Cushioning–Antibacterial Dual-Function Food Packaging Aerogel. *Molecules*, 26(12), 3543. <https://doi.org/10.3390/molecules26123543>