

Artículo de divulgación

Nanocelulosa de agaves: redescubriendo el valor de las plantas ancestrales mexicanas, más allá del tequila y mezcal

Agave nanocellulose: rediscovering the value of ancestral mexican plants beyond tequila and mezcal

Orlando A. Manzanares-Meza ¹, Juliana Morales-Castro ^{1,*}, Ana M. Avila-Galván ¹, Susana Rojas-Varela ¹, Walfred Rosas-Flores ¹, María I. Guerra-Rosas ¹, Blanca E. Morales-Contreras ¹, Héctor. A. Ruíz ², L. Araceli Ochoa Martínez ¹

¹ TECNM/ Instituto Tecnológico de Durango, Depto. Ing. Quim. y Bioq., LANAEPI. Felipe Pescador 1803, Nueva Vizcaya, C.P. 34080, Durango, Durango, México

² Biorefinery Group. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila. Blvd. Venustiano Carranza, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.

* Autor para correspondencia: jmorales@itdurango.edu.mx

Recibido:

30/01/2025

Aceptado:

14/08/2025

Publicado:

6/10/2025

RESUMEN

La nanocelulosa es un material sorprendente que se obtiene al procesar fibras de plantas hasta convertirlas en estructuras muy pequeñas, invisibles al ojo humano, pero con propiedades extraordinarias, como ser muy ligera, fuerte y biodegradable. Una fuente muy prometedora para obtenerla son los Agaves, plantas ampliamente utilizadas en la producción de tequila y mezcal. Durante la elaboración de estas bebidas, se generan residuos como las hojas y el bagazo que suelen ser desechados sin ninguna aplicación. Sin embargo, estos desechos contienen celulosa, que puede transformarse en nanocelulosa mediante diversos procedimientos incluyendo tratamientos biológicos, mecánicos y químicos.

Los nanomateriales de celulosa obtenidos de los Agaves tienen un gran potencial para reforzar plásticos biodegradables, haciéndolos más resistentes y duraderos. Estos plásticos pueden usarse como envases para alimentos y otros productos, ofreciendo una alternativa ecológica a los plásticos tradicionales, que tardan siglos en degradarse. Aprovechar la nanocelulosa de estas plantas, no solo ayuda a reducir los desechos agroindustriales generados en la industria del tequila y mezcal, sino que también brinda la oportunidad de fabricar materiales sostenibles que cuidan al medio ambiente. Este nanomaterial es un ejemplo de cómo podemos emplear la ciencia para innovar, creando soluciones útiles y respetuosas con nuestro planeta.

Palabras clave: Maguey, celulosa, economía circular, bioplásticos, revalorización.

ABSTRACT

Nanocellulose is an amazing material that can be obtained by processing plant fibers into extremely small structures, invisible to the naked eye, but with extraordinary characteristics such as being lightweight, strong, and biodegradable. A very promising source for obtaining nanocellulose are the Agave plants, widely used in the manufacture of tequila and mezcal. During the production of these spirits, residues such as leaves, and

bagasse are generated and often discarded without further application. However, these residues contain cellulose, which can be transformed into nanocellulose through various approaches, including biological, mechanical, and chemical.

Cellulose nanomaterials obtained from Agaves have a great potential for reinforcing biodegradable plastics, making them stronger and more durable. These plastics can be used as packaging materials for food items and other products, offering an eco-friendly alternative to synthetic plastics, which take centuries to degrade. Utilizing nanocellulose from Agaves not only assists in the reduction of agro-industrial waste generated by the tequila and mezcal industries but also provides an opportunity to engineer sustainable materials that protect the environment. This nanomaterial is a prime example of how science can drive innovation, creating practical and environmentally friendly solutions for our planet.

Keywords: Maguey, cellulose, circular economy, bioplastics, revalorization.

INTRODUCCIÓN

Los Agaves son plantas muy especiales para los mexicanos, ya que tienen una relación muy cercana con las personas que viven cerca de ellos, desde antes de la época prehispánica. Estas plantas se consideran originales de México, ya que la mayoría de sus diferentes variedades se encuentran en este hermoso país. Según los mexicas, los Agaves les fueron regalados por la Diosa Mayáhuél, para brindarles alegría y otros dones (SENASICA, 2016).



Figura 1. Botellas de mezcal elaboradas a partir de *Agave durangensis* en Nombre de Dios, Durango, México (Mezcal Burrito Fiestero, 2019).

Desde entonces, los agaves tienen numerosos usos, por ejemplo, como materiales para construir casas, bolsas y cuerdas, hasta la obtención del pulque, que era usado en rituales prehispánicos ceremoniales. Hoy en día, los

Agaves se utilizan, principalmente, para hacer bebidas alcohólicas como el tequila y mezcal, ilustradas en la Figura 1, las cuales son muy famosas internacionalmente por su gran calidad y sabor (Páez-Lerma et al., 2013).

Estas famosas bebidas han acompañado a los mexicanos a lo largo de su increíble historia, llegando a formar parte de su identidad cultural. Además, en la actualidad, representan una fuente de ingresos importante, para muchas comunidades rurales y empresas reconocidas que se dedican a su producción. Mientras que, a nivel internacional, estas bebidas se exportan cada vez más, año con año, comenzando a ser consideradas como importantes fuentes de dinero para México (COMERCAM, 2022; CRT, 2022).

Sin embargo, no todos son beneficios cuando se elaboran estas deliciosas bebidas. Durante su elaboración, se desperdicia una gran parte de los Agaves, ya que su producción sólo utiliza los jugos de la planta que se concentran en el tallo, en la piña o en el corazón (el centro del agave). Por lo que sus hojas o pencas son cortadas y tiradas en el suelo, como se puede observar en la Figura 2, lo que es realmente impactante, y un gran desperdicio, ya que las hojas pueden alcanzar hasta la mitad del peso de los Agaves (Jiménez-Ortega et al., 2024). Notablemente, se cosecharon 2.58 millones de toneladas de Agaves en México tan solo en 2023 (SENASICA, 2023), por lo que desperdiciaron o subutilizaron aproximadamente 1.3 millones de toneladas en solo las hojas.





Figura 2. *Agave durangensis* antes y después de sufrir la jima donde se cortaron sus hojas del tallo.

Además, durante la producción del tequila y mezcal, se generan una gran cantidad de residuos fibrosos llamados bagazo y un líquido llamado vinaza, que, junto con las hojas, considerados residuos orgánicos, son tirados o quemados en los alrededores de las vinatas donde se elaboran las bebidas (Jiménez-Ortega et al., 2024). En este sentido, es necesario encontrar una utilidad adecuada para estos desperdicios, ya que la demanda y oferta del tequila y mezcal incrementan año con año, lo que significa que la generación de estos desperdicios seguirá incrementándose. Por lo que el objetivo de este trabajo de divulgación es dar a conocer el potencial que tienen los Agaves como fuentes de nanocelulosa y su potencial uso para reforzar plásticos biodegradables.

PROCESAMIENTO DE LOS AGAVES Y LA ECONOMÍA CIRCULAR

Actualmente, podemos aplicar estrategias para aprovechar los desperdicios generados durante la elaboración de alimentos y bebidas, como se ilustra en la Figura 3. Además, es posible avanzar hacia procesos de producción sin generación de residuos, aplicando, de esta manera, la “Economía Circular” (Matiacevich et al., 2023).

La economía circular busca minimizar los desperdicios, reducir el uso de energía proveniente de combustibles fósiles y restaurar los suelos, entre otras finalidades. Se trata de un concepto que se puede aplicar en cualquier proceso de producción de artículos o bienes, para hacerlos sostenibles, al disminuir su impacto ambiental, reduciendo las emisiones de dióxido de carbono que contribuyen al cambio climático y promoviendo el uso de energía renovable, como la solar. La aplicación intensiva

del conocimiento científico sobre los recursos biológicos es clave, para producir de manera sostenible bienes y servicios, representando uno de los principales retos para la comunidad científica en la actualidad (Morales-Castro et al., 2018).

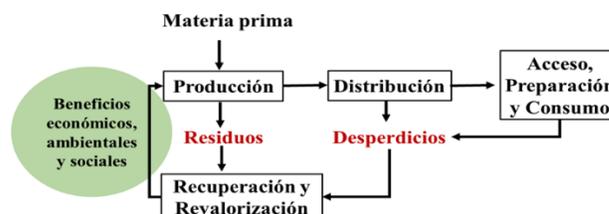


Figura 3. Estrategia para evitar la generación de desperdicios en la cadena de suministro alimentaria.

Los residuos del agave, hojas y bagazo contienen sustancias, como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, por lo que se denominan residuos “lignocelulósicos”, como han sido clasificados científicamente. Y gracias a los avances científicos y al desarrollo tecnológico, día a día, se desarrollan innovaciones que permiten aprovechar estos residuos lignocelulósicos, al igual que muchos otros residuos agrícolas.

VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS GENERADOS EN LA INDUSTRIA DEL TEQUILA Y MEZCAL

Hoy en día, numerosas investigaciones científicas han reportado la composición de las hojas de agave y del bagazo, encontrando que contienen sustancias valiosas para múltiples aplicaciones (Avila-Galván et al., 2024; Márquez-Rangel et al., 2023; Shiva et al., 2023). Desde la elaboración de productos benéficos para la salud humana, producción de enzimas comerciales, alimentos para ganado y aves, hasta accesorios ornamentales, fertilizantes, materiales textiles, productos de papel, envases de alimentos con bioplásticos, fibra vulcanizada para juntas, placas falsas de techo o plafón, materiales aislantes térmicos, soportes laminados y de discos abrasivos (Aleman-Nava et al., 2018; Álvarez-Chávez et al., 2021; Flores-Méndez et al., 2023; García-Villalba et al., 2023; Huitron et al., 2008; Olvera Carranza et al., 2015; Villanueva-Rodríguez et al., 2023).

Tanto la lignina, la hemicelulosa y la celulosa son compuestos valiosos que se pueden utilizar para elaborar diversos productos que faciliten nuestra vida diaria y generen ingresos a partir de los residuos de la industria del tequila y mezcal.

La lignina está formada por numerosas moléculas antioxidantes que cuando están todas juntas protegen a las fibras de celulosa. Estas moléculas antioxidantes se pueden utilizar en la elaboración de cremas protectoras solares (Gutiérrez-Hernández et al., 2016) o en envases de alimentos (Zevallos Torres et al., 2020) que busquen hacer más lento su deterioro o pérdida de calidad. Mientras que la hemicelulosa está formada por distintas moléculas de azúcares que, en conjunto con la lignina forman un material parecido a un pegamento que mantiene unidas a las fibras de celulosa dentro de las plantas. La hemicelulosa se puede utilizar para obtener biocombustibles como el alcohol etílico o para elaborar alimentos que contengan compuestos para mejorar la salud como los famosos probióticos (Álvarez-Chávez et al., 2021).

Finalmente, la celulosa está compuesta por largas cadenas de una sola molécula idéntica llamada glucosa que se repite en muchísimas ocasiones llegando a formar largas fibras que sirven para que las plantas mantengan su forma y no se rompan con facilidad (Jiménez-Ortega et al., 2024; Ponce-Reyes et al., 2014). Debido a sus propiedades, la celulosa tiene muchas aplicaciones que permiten su aprovechamiento en distintas industrias, como se describen a continuación.

De los residuos lignocelulósicos, la celulosa es el más extraordinario porque además de ser la sustancia orgánica más abundante en el planeta, posee características atractivas que han permitido elaborar diferentes productos como ropa, cortinas, celofán, fibra dietética, cosméticos, medicamentos, pañales y toallas sanitarias, hasta materiales de construcción como la fibra vulcanizada, aislantes térmicos, plafón, soportes para abrasivos, entre muchos más (Alejandrino-Nava et al., 2018; Álvarez-Chávez et al., 2021). Sin embargo, las necesidades de la sociedad moderna aumentan cada día y requieren de soluciones complejas que no están al alcance de la celulosa. Sin embargo, la comunidad científica se ha enfocado en desarrollar materiales avanzados, a partir de ella, con la ayuda de la nanotecnología (Ponce-Reyes et al., 2014).

La nanotecnología es una rama de la ciencia que estudia los materiales extremadamente pequeños, llamados nanomateriales. Estos materiales, a pesar de su tamaño, pueden tener propiedades sorprendentes, como ser más fuertes o ligeros, que los mismos materiales en su forma normal. Por lo que, con la ayuda de la nanotecnología, se ha logrado atender problemáticas que necesitan materiales mejorados como la nanocelulosa.

NANOCELULOSA DE AGAVES: SUPERFIBRAS PARA REFORZAR PLÁSTICOS BIODEGRADABLES

La nanocelulosa puede parecer como algo complicado de entender, pero no lo es, ¡para nada! Imagínate, que existe un hilo con el grosor o espesor mil veces más pequeño que un cabello humano; a esto se le conoce como nanómetro. También, podríamos visualizar un metro, como las reglas de madera que se utilizaban en las escuelas primarias hace no muchos años, e imaginarlo un millón de veces más pequeño, esto es, un nanómetro. Todos aquellos materiales que tienen un tamaño nanométrico mejoran sus características a comparación de cuando están en tamaño más grande, como en tamaño de centímetros o micrómetros, a pesar de seguir siendo los mismos materiales y solo con disminuir su tamaño a “escala nano” (Gajanan y Tijare 2018).

Los nanomateriales de celulosa son renovables, biodegradables y muy resistentes, que se pueden utilizar en una diversa cantidad de aplicaciones modernas, como la elaboración de materiales más ligeros para aviones y automóviles, o, incluso, para productos de papel reforzados y plásticos biodegradables. La nanocelulosa es una innovación que permite aprovechar los recursos naturales provenientes de residuos agroindustriales, como las hojas y el bagazo de Agave en la industria mexicana del mezcal, para alcanzar la sustentabilidad y, al mismo tiempo, generar productos de bajo impacto ambiental que mejoren nuestra vida cotidiana.

Estos nanomateriales pueden reforzar plásticos biodegradables, haciéndolos más resistentes a las condiciones del medio ambiente, lo que permite su aplicación como envases de alimentos biodegradables (Lomelí-Ramírez et al., 2018). Esto es importante porque la mayoría de los envases plásticos para alimentos no son biodegradables y permanecerán en el medio ambiente



por siglos. Aunque los plásticos de origen natural son una alternativa, suelen ser más débiles que los sintéticos. Por ello, la nanocelulosa podría emplearse a gran escala para producir plásticos biodegradables resistentes y utilizarlos como envases de alimentos que no contaminen (Cazón y Vázquez 2021).

En la década de los 80's los científicos obtuvieron por primera vez nanocelulosa al triturar celulosa en agua con altas presiones, con características muy atractivas, superando a las de la celulosa normal (Turbak et al., 1983). A partir de este descubrimiento, la comunidad científica comenzó a explorar este supermaterial para desarrollar diferentes materiales biodegradables y alimentos funcionales. La nanocelulosa se puede obtener por diferentes caminos, como lo son, el tratamiento con ácidos químicos, y la molienda mecánica con diversos molinos; sin embargo, los métodos químicos generan residuos tóxicos que contaminan mucho y los mecánicos requieren elevadas cantidades de energía (Robles et al., 2018). Por lo que, recientemente, se han propuesto otros métodos que no son contaminantes, como el uso de sustancias orgánicas y tratamientos con agua caliente a presión, que pueden obtener superfibras sin contaminar el medio ambiente.

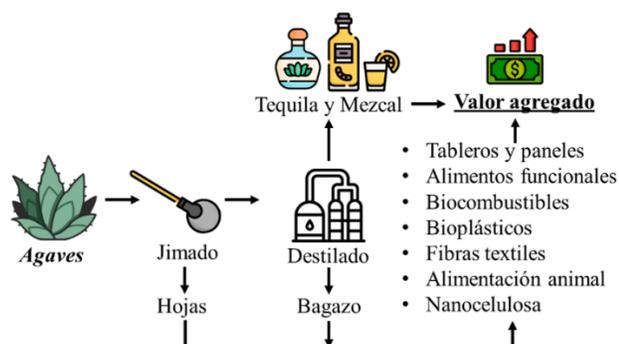


Figura 4. Aprovechamiento de residuos y subproductos de los Agaves bajo el concepto de la economía circular.

Un reto para la producción de nanocelulosa, es que las tecnologías de producción sean sostenibles, aplicando el concepto de la economía circular, por lo que numerosos científicos en el mundo, se encuentran trabajando en la búsqueda de métodos de producción “verdes”, es decir, que sean amigables con el ambiente, que utilicen menos energía o ésta sea de fuentes renovables y que no genere desperdicios, donde los productos y subproductos puedan ser aprovechados de forma total o completa. En este sentido, los residuos y subproductos de los Agaves que se

generan durante la elaboración del tequila y mezcal pueden ser aprovechados para obtener nanocelulosa bajo el concepto de la economía circular, como se ilustra en la Figura 4.

La nanocelulosa obtenida de los residuos y subproductos de los Agaves, es un ejemplo perfecto de cómo se pueden aprovechar los recursos naturales de una manera inteligente y sostenible, cómo lo demostraron trabajos previos en *Agave tequilana*, *Agave sisalana*, *Agave salmiana*, *Agave atrovirens*, *Agave angustifolia*, *Agave gigantea*, entre otros (Chávez-Guerrero et al., 2017; Hernández et al., 2018; Hernández-Varela et al., 2021; Palacios Hinestroza et al., 2019; Peña-Reyes et al., 2017; Ponce-Reyes et al., 2014; Rosli et al., 2021, Rosli et al., 2013; Syafri et al., 2022). Este increíble nanomaterial, no solo ayuda a atender problemáticas ambientales, sino que también posee la capacidad de integrarse en la cadena agroalimentaria y de producción de materiales avanzados e innovadores, demostrando que es posible combinar los avances científicos con la naturaleza para mejorar nuestra calidad de vida de una manera consciente y ecológica (Cazón y Vázquez 2021; Lomelí-Ramírez et al., 2018).

Como es bien sabido, nuestro planeta enfrenta una gran problemática ambiental por la contaminación que se genera como resultado de la sobrepoblación y su siempre creciente demanda de alimentos. Esta gigantesca demanda de alimentos necesita envases adecuados que eviten que se echen a perder cuando se trasladan del lugar donde los producen, hasta el lugar donde las personas los consumen (Manzanares-Meza 2021).

Por mucho tiempo, los envases de alimentos hechos con plásticos sintéticos, han sido la respuesta por su bajo costo, elevada resistencia al medio ambiente y por su capacidad para conservar la calidad de los productos por un largo tiempo. Sin embargo, su uso desmedido, provocó una gran contaminación ambiental en todos lados, lo que se ve reflejado en nuestros pueblos y ciudades, con la presencia abundante en todas partes de bolsas, botellas y diferentes tipos de plásticos que no se degradan y estarán presentes en nuestros paisajes por cientos de años. Más aún, los plásticos han llegado a todos los cuerpos de agua dulce y océanos, afectando los ecosistemas marinos del planeta de igual forma (Alvarez-Zeferino et al., 2020; Van Cauwenberghé y Janssen 2014).

En este contexto, los científicos han desarrollado materiales que pueden reemplazar algunos envases sintéticos de alimentos con plásticos naturales que son biodegradables, por ejemplo, los biopolímeros, como el quitosano, almidón, pectina, alginato, celulosa, ácido poliláctico, proteínas de maíz y del frijol, entre otros (Cazón et al., 2017; Garavand et al., 2017).

Estos biopolímeros son destruidos por seres vivos microscópicos que los utilizan como fuente de alimento. Pero al ser de origen natural, estos plásticos biodegradables son muy sensibles a los diferentes tipos de climas que existen en nuestro planeta. Se pueden ver muy afectados en climas donde hay mucha humedad, volverse mucho más débiles, y no proteger, adecuadamente, el producto que contienen, por lo que es necesario agregar materiales que los puedan reforzar y que les permitan resistir a las condiciones climáticas durante la cadena de producción y distribución (Cazón et al., 2017).

En este sentido, la nanocelulosa se considera como un excelente candidato para reforzar plásticos naturales, como lo demostraron estudios previos donde agregaron nanocelulosa de *Agave cantala*, *Agave angustifolia*, *Agave americana* y *Agave tequilana*, a plásticos biodegradables elaborados con alcohol polivinílico, ácido poliláctico, hidroxipropilmetilcelulosa y almidón de maíz, mejorando su desempeño a comparación de los plásticos sin nanocelulosa (Krishnadev et al., 2021; Lomelí-Ramírez et al., 2018; Montes de Oca-Vásquez et al., 2023; Rosli et al., 2021; Yudhanto et al., 2021). Esto nos acerca cada vez más a la implementación de plásticos biodegradables en nuestra vida cotidiana, con el objetivo de mitigar la contaminación plástica de nuestro planeta.

CONCLUSIONES

En resumen, la nanocelulosa es un tesoro escondido dentro de las plantas, capaz de revolucionar la forma en que fabricamos diversos materiales. Aprovechar este material no solo nos ayudaría a hacer productos más resistentes y ecológicos, sino que también nos invita a repensar el valor de lo que normalmente consideramos desechos. Aprovechar los residuos y subproductos derivados de la elaboración del tequila y mezcal para obtener nanocelulosa y usarla como refuerzo en bioplásticos podría reducir costos de producción y hacer estos procesos más sostenibles. Así que, la próxima vez

que veas un Agave, piensa que en su interior podría estar el futuro de los plásticos biodegradables.

Agradecimientos

El autor principal agradece al Tecnológico Nacional de México/TECNM, y a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnologías e Innovación (SECIHTI) por el apoyo al proyecto y la beca No. 20357.24-P y No. 966556, respectivamente.

Literatura citada

- Alemán-Nava, G.S., Gatti, I.A., Parra-Saldivar, R., Dallemand, J.-F., Rittmann, B.E., e Iqbal, H.M.N. 2018. Biotechnological revalorization of Tequila waste and by-product streams for cleaner production – A review from bio-refinery perspective. *Journal of Cleaner Production*. 172:3713–3720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.134>
- Álvarez-Chávez, J., Villamiel, M., Santos-Zea, L., y Ramírez-Jiménez, A.K. 2021. Agave by-products: an overview of their nutraceutical value, current applications, and processing methods. *Polysaccharides*. 2(3):720–743. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2030044>
- Alvarez-Zeferino, J.C., Ojeda-Benítez, S., Cruz-Salas, A.A., Martínez-Salvador, C., y Vázquez-Morillas, A. 2020. Microplastics in mexican beaches. *Resources, Conservation and Recycling*. 155:104633. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104633>
- Avila-Galván, A.M., Morales-Castro, J., Ruíz-Leza, H.A., Manzanares-Meza, O.A., Morales-Contreras, B.E., Inés Guerra-Rosas, M., y Rosas-Flores, W. 2024. La segunda vida del agave: nuevas aplicaciones para residuos agroindustriales de las industrias del tequila y mezcal. *Frontera Biotecnológica*. 2:34–43.
- Cazón, P., y Vázquez, M. 2021. Bacterial cellulose as a biodegradable food packaging material: A review. *Food Hydrocolloids*. 113:106530. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106530>
- Cazón, P., Velazquez, G., Ramírez, J.A., y Vázquez, M. 2017. Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*. 68:136–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.009>



- Chávez-Guerrero, L., Sepúlveda-Guzmán, S., Rodríguez-Liñan, C., Silva-Mendoza, J., García-Gómez, N., y Pérez-Camacho, O. 2017. Isolation and characterization of cellulose nanoplatelets from the parenchyma cells of *Agave salmiana*. *Cellulose*. 24:3741–3752. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1376-9>
- Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM) A. C. 2022. Informe Estadístico 2022. In: <https://comercam-dom.org.mx/estadisticas/> (Fecha de consulta: 29 diciembre 2022).
- Consejo Regulador del Tequila (CRT). 2022. Producción total: Tequila. In: <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/> (Fecha de consulta: 29 diciembre 2022).
- Flores-Méndez, D.A., Pelayo-Ortiz, C., Martínez Gómez, Á. de J., Toriz, G., Guatemala-Morales, G.M., y Corona-González, R.I. 2023. Evaluation of Agave tequilana by-products for microbial production of hyaluronic acid. *Bioresource Technology Reports*. 21:101366. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101366>
- Gajanan, K., y Tijare, S.N. 2018. Applications of nanomaterials. *Materials Today: Proceedings*. 5(1):1093–1096. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.187>
- Garavand, F., Rouhi, M., Razavi, S.H., Cacciotti, I., y Mohammadi, R. 2017. Improving the integrity of natural biopolymer films used in food packaging by crosslinking approach: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 104:687–707. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.06.093>
- García-Villalba, W.G., Rodríguez-Herrera, R., Ochoa-Martínez, L.A., Rutiaga-Quiñones, O.M., López, M.G., Gallegos-Infante, J.A., Bermúdez-Quiñones, G., y González-Herrera, S.M. 2023. Comparative study of four extraction methods of fructans (agavins) from *Agave durangensis*: Heat treatment, ultrasound, microwave and simultaneous ultrasound-microwave. *Food Chemistry*. 415:135767. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135767>
- Gutiérrez-Hernández, J.M., Escalante, A., Murillo-Vázquez, R.N., Delgado, E., González, F.J., y Toríz, G. 2016. Use of Agave tequilana-lignin and zinc oxide nanoparticles for skin photoprotection. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 163:156–161. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.08.027>
- Hernández, J., Romero, V., Escalante, A., Toríz, G., Rojas, O.J., y Sulbarán, B. 2018. Agave tequilana bagasse as source of cellulose nanocrystals via organosolv treatment. *BioResources*. 13(2):3603–3614. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.3603-3614>
- Hernández-Varela, J.D., Chanona-Pérez, J.J., Calderón Benavides, H.A., Cervantes Sodi, F., y Vicente-Flores, M. 2021. Effect of ball milling on cellulose nanoparticles structure obtained from garlic and agave waste. *Carbohydrate Polymers*. 255:117347. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117347>
- Huitron, C., Perez, R., Sanchez, A.E., Lappe, P., y Rocha Zavaleta, L. 2008. Agricultural waste from the tequila industry as substrate for the production of commercially important enzymes. *Journal of Environmental Biology*. 29(1):37-41.
- Jiménez-Ortega, L.A., Valdez-Baro, O., Bernal-Millán, M.J., Rivera-Salas, M.M., y Basilio Heredia, J. 2024. Agave byproducts: As sources of phytochemicals with functional activities and their management for industrial applications. 385–416 pp. In: Gómez-García, R., Vilas-Boas, A.A., Campos, D.A., Pintado, M.M., y Aguilar, C.N. (Ed. (s)). *Food byproducts management and their utilization*. Apple Academic Press. New York, NY, USA. 520 p.
- Krishnadev, P., Subramanian, K.S., Lakshmanan, A., Ganapathy, S., Raja, K., y Rajkishore, S.K. 2021. Hydroxypropyl methylcellulose nanocomposites containing nano fibrillated cellulose (NFC) from *Agave americana* L. for food packaging applications. *BioResources*. 16(4):8125–8151. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.8125-8151>
- Lomelí-Ramírez, M.G., Valdez-Fausto, E.M., Rentería-Urquiza, M., Jiménez-Amezcu, R.M., Anzaldo Hernández, J., Torres-Rendon, J.G., y García Enriquez, S. 2018. Study of green nanocomposites based on corn starch and cellulose nanofibrils from *Agave tequilana* Weber. *Carbohydrate Polymers*. 201:9–19. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.045>
- Manzanares-Meza, O.A. 2021. Properties of pectin-based films with SiO₂ and corn starch during storage at different temperature. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, Nuevo León, México. 171 p. <https://hdl.handle.net/11285/641221>



- Márquez-Rangel, I., Cruz, M., Ruiz, H.A., Rodríguez-Jasso, R.M., Loredó, A., y Belmares, R. 2023. Agave waste as a source of prebiotic polymers: Technological applications in food and their beneficial health effect. *Food Bioscience*. 56:103102. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103102>
- Matiacevich, S., Soto Madrid, D., y Gutiérrez Cutiño, M. 2023. Economía circular: obtención y encapsulación de compuestos polifenólicos provenientes de residuos agroindustriales. *Revista Iberoamericana de Viticultura, Agroindustria y Ruralidad*. 10(28):77–100. <https://doi.org/10.35588/rivar.v10i28.5343>
- Mezcal Burrito Fiestero. 2019. Another day, another batch of Mezcal Burrito Fiestero ready to travel around the world. In: <https://www.facebook.com/MezcalBurrito/photos/pb.100063456551050.-2207520000/1418018458366748/?type=3> (Fecha de consulta: 7 enero 2025).
- Montes de Oca-Vásquez, G., Esquivel-Alfaro, M., Vega-Baudrit, J.R., Jiménez-Villalta, G., Romero-Arellano, V.H., y Sulbarán-Rangel, B. 2023. Development of nanocomposite chitosan films with antimicrobial activity from agave bagasse and shrimp shells. *Journal of Agriculture and Food Research*. 14:100759. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100759>
- Morales-Castro, J., Muiy-Rangel, M.D., A., O.-M.L., Morales-Contreras, B.E., y Guerra-Rosas, M.I. 2018. Desperdicio alimentario y subproductos agroindustriales en el marco de la Bioeconomía y Economía Circular: hacia sistemas alimentarios sostenibles. 1–35 pp. In: González-Aguilar, G., Hernández-Mendoza, A., Milán-Carrillo, J., Vallejo-Córdoba, B., y González-Córdoba, A.F. (Ed.(s)). *Aprovechamiento de subproductos de la industria alimentaria para la obtención de compuestos bioactivos*. AGT Editor. Distrito Federal, México. 806 p.
- Olvera Carranza, C., Ávila Fernandez, A., Bustillo Armendáriz, G.R., y López-Munguía, A. 2015. Processing of fructans and oligosaccharides from Agave plants. 121–129 pp. In: Preedy, V. (Ed.). *Processing and impact on active components in food*. Academic press. San Diego, CA, USA. 699 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404699-3.00015-9>
- Páez-Lerma, J.B., Arias-García, A., Rutiaga-Quiñones, O.M., Barrio, E., y Soto-Cruz, N.O. 2013. Yeasts isolated from the alcoholic fermentation of Agave duranguensis during mezcal production. *Food Biotechnology*. 27(4):342–356. <https://doi.org/10.1080/08905436.2013.840788>
- Palacios Hinestroza, H., Hernández Diaz, J.A., Esquivel Alfaro, M., Toriz, G., Rojas, O.J., y Sulbarán-Rangel, B.C. 2019. Isolation and characterization of nanofibrillar cellulose from Agave tequilana Weber bagasse. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019(1). <https://doi.org/10.1155/2019/1342547>
- Peña-Reyes, V.L., Marin-Bustamante, M.Q., Manzo-Robledo, A., Chanona-Pérez, J.J., Cásarez-Santiago, R.G., y Suarez-Najera, E. 2017. Effect of crosslinking of alginate / pva and chitosan / pva, reinforced with cellulose nanoparticles obtained from agave *Atrovirens karw.* *Procedia Engineering*. 200:434–439. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.061>
- Ponce-Reyes, C.E., Chanona-Pérez, J.J., Garibay-Febles, V., Palacios-González, E., Karamath, J., Terrés-Rojas, E., y Calderón-Domínguez, G. 2014. Preparation of cellulose nanoparticles from Agave waste and its morphological and structural characterization. *Revista mexicana de ingeniería química*. 13(3):897–906.
- Robles, E., Fernández-Rodríguez, J., Barbosa, A.M., Gordobil, O., Carreño, N.L.V., y Labidi, J. 2018. Production of cellulose nanoparticles from blue agave waste treated with environmentally friendly processes. *Carbohydrate Polymers*. 183:294–302. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.015>
- Rosli, N.A., Ahmad, I., y Abdullah, I. 2013. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from agave angustifolia fibre. *BioResources*. 8(2):1893–1908. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1893-1908>
- Rosli, N.A., Wan Ishak, W.H., Darwin, S.S., Ahmad, I., y Mohd Khairudin, M.F.A. 2021. Bio-nanocomposites based on compatibilized poly(lactic acid) blend-reinforced Agave cellulose nanocrystals. *BioResources*. 16(3):5538–5555. <https://doi.org/10.15376/biores.16.3.5538-5555>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). 2023. Panorama del sector agrícola. In: <https://dj.senasica.gob.mx/SIAS/Statistics/Transversal/PanoramaAgricola> (Fecha de consulta: 11 abril 2025).
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). 2016. Un regalo de



los Dioses: el agave. In: <https://www.gob.mx/senasica/articulos/un-regalo-de-los-dioses-el-agave> (Fecha de consulta: 18 agosto 2024).

A review. *Journal of Cleaner Production*. 263:121499. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121499>

Shiva, Rodríguez-Jasso, R.M., López-Sandin, I., Aguilar, M.A., López-Badillo, C.M., y Ruiz, H.A. 2023. Intensification of enzymatic saccharification at high solid loading of pretreated agave bagasse at bioreactor scale. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 11(1):109257. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109257>

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

Syafri, E., Jamaluddin, Sari, N.H., Mahardika, M., Amanda, P., y 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.2021.12.111>

Turbak, A.F., Snyder, F.W., y Sandberg, K.R. 1983. Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: Properties, uses, and commercial potential. 815–827 pp. In: Sarko, A. (Ed.). *Proceedings of the ninth cellulose conference, Applied Polymer Symposia*. Wiley. New York, NY, USA.

Van Cauwenberghe, L., y Janssen, C.R. 2014. Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environmental Pollution*. 193:65–70. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.010>

Villanueva-Rodríguez, F., Hernández-Barrón, L.A., Hernández-Barrón, D. V, Caudillo-Díaz, T., Arteaga-Domínguez, M.D.S.C., Pérez-Escalón, E., Reyes-Gutiérrez, S.A., y Gutiérrez-Arenas, D.A. 2023. Fibra de agave como prebiótico sobre variables hematológicas en pollos de engorda. *Jóvenes en la Ciencia*. 21. <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/9568>

Yudhanto, F., Jamasri, j., Rochardjo, H.S.B., y Kusumaatmaja, A. 2021. Experimental study of polyvinyl alcohol nanocomposite film reinforced by cellulose nanofibers from *Agave cantala*. *International Journal of Engineering*. 34(4):987–998. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.04a.25>

Zevallos Torres, L.A., Lorenci Woiciechowski, A., de Andrade Tanobe, V.O., Karp, S.G., Guimarães Lorenci, L.C., Faulds, C., y Soccol, C.R. 2020. Lignin as a potential source of high-added value compounds:

