

Capítulo 3

Nanocelulosa de bagazo de Agave tequilana weber variedad Azul: Una alternativa innovadora y sustentable en el manejo de la biomasa de la zona occidente de México

Sulbarán-Rangel Belkis¹
García Enríquez Salvador²
*Jiménez Amezcua Rosa María*³*
Lomelí Ramírez María Guadalupe¹
Rentería Urquiza Maite⁴
Palacios Hinestroza Hasbleidy⁵

<https://doi.org/10.61728/AE20246044>

¹ Departamento de Agua y Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, Tonalá C.P. 45425, Jalisco, México.

² Departamento de Madera, Celulosa y Papel del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Zapopan, C. P. 45220, Jalisco, México.

³ Departamento de Ingeniería Química. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, C. P. 44430, Jalisco. México. *Autor de correspondencia: rosa.jamezcua@academicos.udg.mx

⁴ Departamento de Química. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco. México.

⁵ Departamento de Ingeniería Biológica, Sintética y de Materiales, Centro Universitario de Tlajomulco. Universidad de Guadalajara. Tlajomulco de Zúñiga, C. P. 45670, Jalisco, México.

Resumen

Es importante reflexionar sobre la producción de grandes volúmenes de biomasa que se generan en la producción del tequila, los cuales tienen como destino final el suelo y los cuerpos de agua, considerados como elementos básicos de todo ecosistema; catalogando a la industria tequilera como una de las industrias más contaminantes en el occidente de México. Según datos del Consejo Regulador de Tequila (CRT)⁶ en el 2021 se usaron casi un millón de toneladas de agave y se generaron aproximadamente 9418 toneladas de bagazo de agave. Estos residuos son grandes contaminantes para el medioambiente si no son tratados y/o aprovechados eficientemente. Este capítulo, resulta ser un compendio donde se analizan diferentes estudios para la obtención de nanotecnología obtenida de la biomasa agroindustrial generada por los residuos de la industria tequilera, convirtiéndolos en una oportunidad de innovación y transferencia de tecnología que permite la reintegración de estos materiales a la cadena productiva. Por lo que, el empleo de la biomasa del Agave tequilana Weber variedad azul, presenta una oportunidad en la investigación básica y aplicada, así como en el desarrollo tecnológico. Sin embargo, es necesario realizar estudios que permitan la optimización de estos procesos, así como realizar los estudios de factibilidad técnico-económica circular y de sustentabilidad para la obtención de nanomateriales a partir de los residuos provenientes de la explotación del agave.

Introducción

El cultivo del Agave tequilana Weber resulta ser un sistema de producción ligado necesariamente a la propia historia del Occidente Mexicano

⁶ El Consejo Regulador del Tequila, A.C. (CRT) es la organización dedicada a inspeccionar y certificar el cumplimiento con la Norma Oficial del Tequila, así como a promover la calidad, la cultura y el prestigio de la bebida nacional por excelencia. <https://www.crt.org.mx/>

y del propio País. Un cultivo que por sí mismo da belleza a los entornos y escenarios regionales. Cargado de simbolismos, tradiciones y leyendas, pero también en la actualidad a través de su transformación industrial a tequila, visto desde una visión puramente economicista se transforma en un baluarte y captador de divisas para la nación. Sin embargo, el proceso industrial al que es sometida la piña del agave es un generador de subproductos, que sin un manejo idóneo se convierte en un peligro real para la estabilidad del ecosistema a mediano y largo plazo, ya que son una fuente contaminante para los recursos naturales y el medioambiente regional. Diferentes investigaciones han abordado el manejo que se le debe dar a los subproductos.

No obstante, lo incipiente de ello no ha permitido llegar a conclusiones contundentes. Paradójicamente, en la región occidental del país conviven hombro con hombro los escenarios agaveros y la industria del tequila, con unidades familiares campesinas que día a día diseñan y operan estrategias de sobrevivencia de reproducción social que en la mayoría se caracterizan por privilegiar un aprovechamiento racional y holístico de los recursos naturales tendientes a la estabilidad del ecosistema y donde la visión economicista solamente es parte de una visión integral.

Sin embargo, es importante reflexionar sobre la producción de grandes volúmenes de biomasa que se generan en la producción del tequila, y la disposición final de los residuos debido a que, según la Secretaría Mexicana de Agricultura, la exportación de tequila y mezcal representó 1.146 millones de dólares en los primeros cinco meses de 2021. Según Warren-Vega et al., 2022, a finales de este mismo año se incrementó la producción del tequila con un record histórico de 527.1 millones de litros. Por lo que actualmente es el tercer producto agroalimentario con más demanda extranjera, solo por detrás de la cerveza y el aguacate (INEGI, 2022).

Varios factores contribuyeron a este importante desarrollo, como el establecimiento de una Denominación de Origen, la primera otorgada en México, (NOM-006-SCFI, 2012),⁷ una internacionalización de la industria, un Consejo Regulador del Tequila¹ que cuida la calidad y la autenticidad, y una Cámara Nacional de la Industria Tequilera⁸ que promueve entre otras

⁷ Norma Mexicana (de la Federación, M. D. O. (2012). NOM-006-SCFI-2012. Norma Oficial Mexicana: Bebidas alcohólicas-Tequila-especificaciones).

⁸ Cámara Nacional de la Industria Tequilera.

cosas esta bebida, sobre todo fuera del país. En este sentido, las denominaciones de origen mexicanas se encuentran protegidas y registradas internacionalmente. El tequila está registrado desde el 13 de abril de 1974 (Álvarez-Ainza, 2017). Para obtener un litro de tequila se requiere en promedio 4-6 kg de la materia prima conocida como piñas de agave, generando de 3 a 4 kg en base húmeda de un residuo sólido denominado bagazo de agave. El bagazo de agave es un material de aspecto fibroso con altos contenidos de humedad y está principalmente formado por 42 % de celulosa, 20 % de hemicelulosa y 21 % de lignina (Hernández et al., 2018). El mayor porcentaje corresponde a la celulosa, este es un polímero de gran interés debido a su abundancia y su capacidad de ser aislado a escala nanométrica, debido a su estructura jerárquica. Las fibras de celulosa y nanocelulosa son un componente estructural formado por un proceso de manufactura celular, biogénesis celular, estabilizado por enlaces de hidrógeno y fuerzas de van der Waal. (Salas et al., 2014). Por lo tanto, el objetivo de esta revisión es mostrar los antecedentes sobre el uso y métodos de transformación del bagazo de agave y sus avances en cuanto a las investigaciones relacionadas con la nanocelulosa de bagazo de agave.

La industria tequilera historia e impacto económico, social y ambiental

El *Agave tequilana* pertenece a la familia de las agaváceas agrupado en el orden de las Asparagales. Este género lo constituyen 197 taxas: 136 especies, 26 subespecies, 29 variedades y 7 formas (Pérez y Del Real, 2007). El género *Agave* fue descrito por primera vez por Carl Linnaeus en 1753 (Vázquez-Acosta et al., 2020). La especie tequilana fue descrita por Weber en 1902 (Pérez y Del Real, 2007). Las especies de este grupo se caracterizan por sus hojas angostas y rígidas, radialmente extendidas desde la base; se caracterizan además por sus panículas relativamente pequeñas, abiertas, bractéoladas y ramificadas. Es una planta acaule (de tallo tan corto que parece inexistente, de tal forma que las hojas nacen a ras del suelo), multianual y de lento crecimiento, con un ciclo biológico de 6 a 15 años, terminando en la floración de la planta (Pérez y Del Real, 2007; Del Real 2019).

Agave tequilana variedad azul, es utilizada como materia prima para la elaboración de tequila, se establece como territorio de origen el comprendido por el estado de Jalisco; los municipios de Abasolo, Ciudad Manuel

Doblado Cueraímario, Huanimaro, Pénjamo y Purísima del Rincón, del estado de Guanajuato; los municipios de Briseñas de Matamoros, Chavinda, Chilchota, Churintzio, Cotija, Ecuandureo, Jacona, Jiquilpan, Maravatio, Nuevo Parangaricutiro, Numarán, Pajacuarán, Peribán, La piedad, Régules, Los Reyes, Sahuayo, Tancítaro, Tangamandapio, Tangancícuelo, Tanhuato, Tingüindín, Tocumbo, Venustiano Carranza, Villamar, Vistahermosa, Yurécuero, Zamora, Zináparo y Marcos Castellanos, del estado de Michoacán; los municipios de Ahuacatlán, Amatlán de Cañas, Ixtlán, Jala, Jalisco, San Pedro de Lagunillas, Santa María del Oro y Tepic, del estado de Nayarit; y los municipios de Aldama, Altamira, Antiguo de Morelos, Gómez Farías, González, Llera, Mante, Nuevo Morelos, Ocampo, Tula y Xicoténcatl del estado de Tamaulipas. Solamente en esos municipios se puede utilizar la materia prima para la elaboración del tequila (CRT, 2022). En la Figura 1 se encuentran identificados los 5 estados con la denominación de origen para la producción del tequila.



Figura 1. Estados con denominación de origen para el cultivo del *Agave tequilana* Weber var. Azul y la producción de tequila (CRT, 2022)

En los últimos años, el consumo agave y la producción de tequila se ha incrementado notablemente y ha contribuido al desarrollo agrícola e industrial de México, pero especialmente del estado de Jalisco. En 1995, la industrialización de pencas de agave fue de 278.7 toneladas, en 2010 fue de 1015.1 toneladas, en 2020 de 1407.0 toneladas y para 2021 fue de 2018.7 toneladas (CRT, 2022), observándose un incremento constante en los últimos 10 años.

El tequila se clasifica en dos tipos, de acuerdo con su elaboración: tequila 100 % de agave, aquí se usan exclusivamente los azúcares del Agave tequilana Weber var. azul para su producción; y el tequila, al que se le adicionan hasta un 49 % de otros azúcares que no son de agave como glucosa, piloncillo o sacarosa (Bowen y Zapata 2009; Pinal y Gschaedler, 1998). En la Figura 2 se puede observar la tendencia del consumo de Agave tequilana Weber var. Azul para la producción de tequila y tequila 100 %.

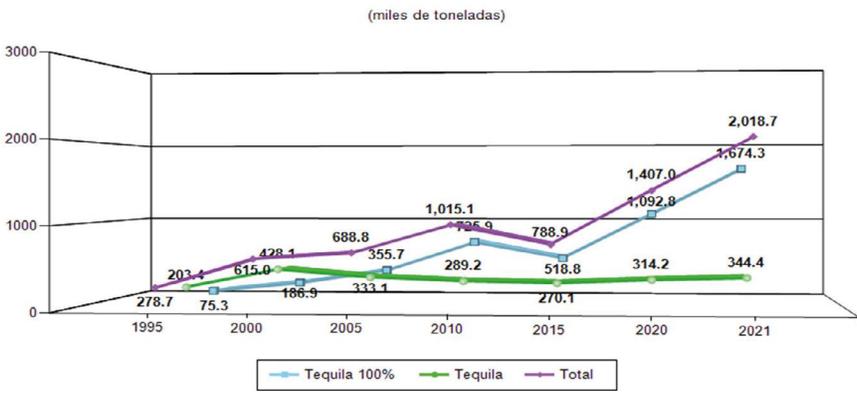


Figura 2. Consumo de Agave para Tequila y Tequila 100 % de Agave (CRT, 2022)

En la Figura 2 se puede observar que, en los últimos 25 años el mercado de producción de tequila ha tenido un incremento significativo. Desafortunadamente, este explosivo crecimiento de la industria tequilera implica el desatendido manejo y disposición de dos de los principales subproductos: bagazo de agave y vinazas tequileras (Palacios et al., 2019). Pese al alto poder contaminante de estos dos residuos, muy pocas empresas han resuelto con éxito su manejo. Los métodos más empleados para el manejo de estos subproductos son la separación de sólidos sedimentables y diges-

ción anaerobia, seguida por lagunas de aireación o lodos activados. En lo referente al manejo del bagazo, la mayoría de las grandes y medianas empresas han optado por el compostaje como recurso para disponer de estos, los sólidos sedimentables o los biosólidos de las plantas de tratamiento (Iñiguez, et al. 2019).

Bagazo de agave como fuente de celulosa

En la Figura 3 se muestra la imagen de una planta de agave weber variedad azul. Esta planta es de tipo xerófila (que crece en zonas áridas y cálidas) de hojas rígidas color azul-verdoso originado por un alto contenido de ceras las cuales impiden que la planta pierda agua, son delgadas y casi planas a estas se les conoce como “pencas”; mide aproximadamente 1.25 m de largo y 10 cm de ancho y tiene una espina terminal de color rojo oscuro de 2 cm (Bautista et al., 2001).



Figura 3. *Planta de Agave tequilana Weber variedad azul*

En México la principal materia prima para la elaboración de tequila es el *Agave tequilana Weber variedad azul*, el cual es la única especie autorizada para ser usada en la producción de tequila. La elaboración del tequila juega un papel muy importante en el desarrollo social, cultural y económico no solo de los estados productores, sino de todo el país (Zurita et al., 2022). Del 100 % de la producción de bebidas alcohólicas en México, 18.6 %

corresponde al tequila y al mezcal, siendo la segunda actividad económica más importante de este grupo de bebidas; de este 18.6 %, el 86 % consiste en producción de tequila. De igual manera la industria del tequila generó en México, casi 6000 empleos en 2018 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía y Consejo Agroalimentario de Jalisco, 2019). A pesar de la importancia que tiene la producción de tequila en México, dicha producción implica ciertos inconvenientes. Estos inconvenientes consisten principalmente en la generación de residuos perjudiciales para el medioambiente, destacando las vinazas tequileras y el bagazo (Figura 4).



Figura 4. Subproductos obtenidos después de la elaboración del tequila A: vinazas tequileras; B: Bagazo de *Agave tequilana* Weber

Debido a la gran producción de tequila en el estado de Jalisco en México, el bagazo de agave es una fuente abundante de biomasa lignocelulósica (Alemán-Nava et al., 2018; Hernández et al., 2018; Robles-García et al., 2018). El bagazo es un subproducto sólido de naturaleza fibrosa que se obtiene después de la molienda de la piña del agave y extracción de los azúcares fermentables en la fabricación del tequila (Alemán-Nava et al., 2018). Se estima, que la biomasa fibrosa que resulta de la molienda de la piña del agave es equivalente al 40 % del peso total en base húmeda (Iñiguez-Covarrubias et al., 2001).

El bagazo de agave, por su alta disponibilidad, tradicionalmente siempre ha implicado serios problemas para esta industria, porque su disposición final requiere altos costos de manejo (Zamora Natera et al., 2010). Convirtiéndose esto en un problema de contaminación ambiental ya que

la mayor parte de este residuo termina como desecho en tiraderos clandestinos debido a la poca regulación ambiental. Esto ocasiona efectos negativos a la fertilidad de tierras de cultivo (Gobeille et al., 2006), contaminación por lixiviados y riesgos fitosanitarios por la inadecuada incorporación de este material al suelo (Zamora Natera et al., 2010; Zurita et al., 2022).

No obstante, y con base en su composición química se sabe que el bagazo de agave contiene (celulosa 44.5 %, hemicelulosa 25.3 % y lignina; 20.1 % (Palacios Hinestroza et al., 2019; Hernández et al., 2018). por lo cual se ha tratado de diversificar sus aplicaciones en diferentes áreas. Por ejemplo, para la producción de biopolímeros, elaboración de composta, alimentación animal, generación de biocombustibles (Alemán-Nava et al., 2018; Irigüez-Covarrubias et al., 2001). Material de refuerzo y recientemente se estudia para la producción de nanofibras y nanocristales de celulosa (Palacios Hinestroza et al., 2019; Lomelí-Ramírez et al., 2018; Hernández et al., 2018; Robles-García et al., 2018).

Obtención de celulosa a partir de bagazo de agave

La celulosa de bagazo de agave como cualquier fuente vegetal puede obtenerse por procesos químicos o mecánicos. La principal función de utilizar procesos químicos para la deslignificación de materiales lignocelulósicos es separar de la pared de las células vegetales la celulosa, la hemicelulosa y la lignina como se observa en la Figura 5.

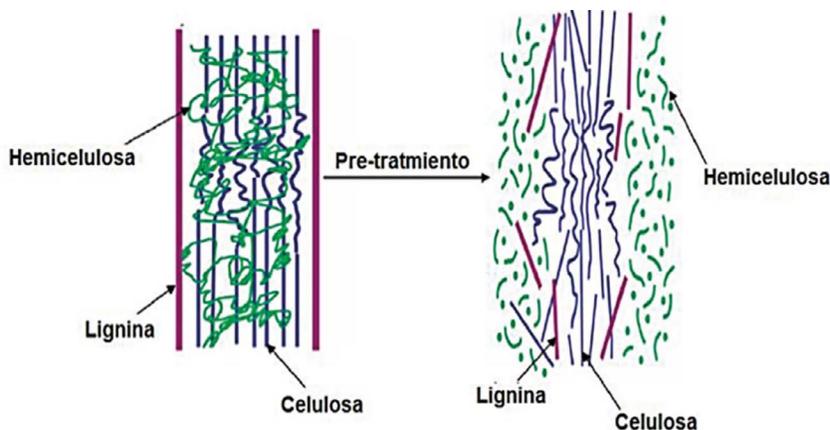


Figura 5. Representación del fraccionamiento del material lignocelulósico (Kumar et al., 2009)

Se conocen varios procesos para la obtención de celulosa. Para el caso del bagazo de agave se han reportado la utilización de los siguientes métodos de extracción:

- Método organosolv, (órgano = orgánico y solv = solvente) también conocido como “ALL CELL” es un proceso de deslignificación en el que se utiliza agua y solventes orgánicos con bajo punto de ebullición (etanol, metano, acetona, ácido acético, etc.) los cuales tienen la función de remover lignina, hemicelulosas y extraíbles de los materiales lignocelulósicos y así poder individualizar las fibras de celulosa. La ventaja de utilizar este tipo de disolventes es que son fáciles de recuperar por destilación (Palacios Hinestroza et al., 2019; Hernández et al., 2018; Robles et al., 2018).
- Método alcalino: el pulpeo alcalino se caracteriza por el uso de hidróxido de sodio, para la obtención de celulosa de bagazo de agave se ha empleado NaOH (19 a 23 %) y antraquinona (0.1 %), hidromodulo de 1:5 y 1:8, en un digestor por 90 o 150 minutos a 170 ± 5 °C (Lomelí et al., 2018; Gallardo et al., 2019). Otra metodología que se ha reportado es usar una proporción de 1:10 de agua destilada e hidróxido de sodio con una temperatura de 195 °C y tiempo de 1 h en un reactor tipo Jaime (Hernández et al., 2018).
- Método con clorito de sodio: para este método se utiliza soluciones que contengan clorito de sodio (NaClO_2) y ácido acético para eliminar la lignina del bagazo de agave (Robles-García et al., 2018). Seguido se realiza una extracción de hemicelulosas y banqueo de las fibras de bagazo de agave (Hernández et al., 2018).

La celulosa de bagazo de agave, también puede ser extraída por otro método comúnmente empleado para evaluar el contenido de α -celulosa y hemicelulosa de materiales lignocelulósicos. El cual consiste en pesar 70 g de bagazo de agave y se colocan en un matraz de 2 L, se agregaron 1000 mL de solución A (ácido acético 1.049M e hidróxido de sodio 0.5M) y 100 mL de solución B (hipoclorito de sodio 20 % p/v), Se adicionan 100 mL de la solución B a los 45, 90, 150 y 210 min y se lleva a cabo la digestión a una temperatura de 70 °C. El contenido de holocelulosa (α -celulosa+hemicelulosas) de las fibras se obtiene tratando la fibra con NaClO_2 (20 %

p/v) y NaOH (0,5 M). El contenido de α -celulosa de la fibra se extrae mediante un tratamiento posterior de las fibras con NaOH (17,5 % p/v) para eliminar las hemicelulosas. Posteriormente se agregan 1500 mL de agua para detener la reacción, los sólidos se filtraron y son lavados con agua, ácido acético, agua y acetona hasta obtener un líquido transparente, y finalmente se colocan en una estufa a 105 °C por 24 h para determinar el contenido de celulosa (Montaño-Leyva et al., 201; Robles-García et al., 2018).

Las cocciones se deben realizar en recipientes a presión de acero inoxidable de 1 L y se sumergen en un baño de aceite caliente para controlar la temperatura. El tiempo hasta la temperatura máxima oscila entre 20-30 min, y el tiempo a la temperatura máxima debe ser entre (165, 175 y/o 185 °C) se sugiere variar el tiempo entre 45 min a 3 h. Todas las cocciones se deben realizar en una proporción de licor a agave de 7:1. Las condiciones para la cocción kraft son 20 % de álcali activo y 25 % de sulfuro. La cocción con etanol organosolv se realiza con etanol acuoso al 50 % (v/v), la cocción con soda al 20 % de concentración de hidróxido de sodio (sobre la base de una carga de agave, secado al horno) y la cocción con soda-etanol al 20 % de hidróxido de sodio. concentración (basada en carga de agave, base seca al horno) en etanol acuoso al 50 % (v/v) (Idarraga et al., 1999).

La extracción de compuestos en el bagazo de agave influye en la morfología de las fibras del material. Se ha reportado que las fibras de celulosa de bagazo de agave están en el orden de 0.5-0.6 mm según los análisis de calidad de la fibra (FQA) (Hernández et al., 2018; Kestur G et al., 2013). La estructura y morfología de las fibras del bagazo de agave, se pueden observar mediante la realización de imágenes en el microscopio electrónico de barrido (SEM). En la Figura 6A se aprecian, fibras de celulosa obtenidas a partir de bagazo de agave, en la escala de 200 μ m se visualiza como las fibras son aplanadas y algunas presentan porosidad propia de las estructuras vasculares de la planta de agave. Además, en la Figura 6 B y C se observa el giro helicoidal de las microfibrillas para conformar las fibras de celulosa. Al realizar un acercamiento de 10 μ m a una fibra, en la Figura 6D, es posible identificar con más detalle las microfibrillas.

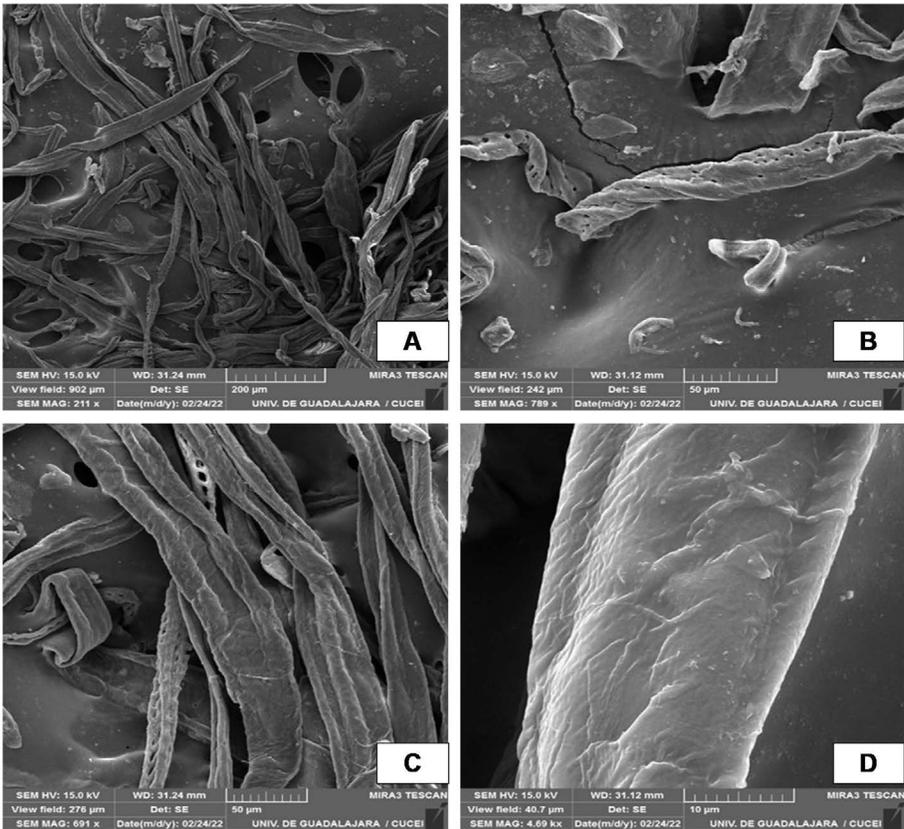


Figura 6. Morfología de fibras de celulosa de bagazo de agave: A) 200 μm , B) y C) 50 μm , y D) 10 μm

La cristalinidad y el grado de polimerización son dos parámetros principales para afectar las propiedades de la celulosa. El grado de polimerización (DP por sus siglas en inglés degree of polymerization) se refiere a la longitud de la cadena del polímero que está determinada por el número de unidades que se repiten en la cadena y la cristalinidad se dará por el orden de las moléculas en la cadena. Se ha reportado que la celulosa de agave tiene una cristalinidad de entre 65 y 70 %, (Palacios et al., 2019; Kestur et al., 2013). En cuanto al DP, se ha reportado que la celulosa de bagazo de agave está entre 500 a 650 unidades, la cual depende del método de extracción; y desempeña un papel importante en la hidrólisis y modificación de la celulosa (Hernández et al., 2018).

Nanocelulosa a partir de bagazo de agave

La celulosa se puede modificar a escalas nanométrica por diferentes métodos y obtener nanocelulosa. El término nanocelulosa se refiere a un material que tienen al menos una de sus dimensiones en el rango nanométrico. Las cadenas de las moléculas de nanocelulosa están en forma tubular alargada teniendo una marcada relación de aspecto longitud-diámetro. La tendencia o magnitud típica del diámetro es de 10 a 20 nanómetros y la de su longitud es de 10 veces o más, la de su diámetro. Esta propiedad geométrica de la molécula la hace muy sensible a diferentes campos de aplicación (Moon et al., 2011; Salas et al., 2014). La nanocelulosa obtenida del bagazo de agave se pueden clasificar en dos subcategorías principales que dependen de las dimensiones, funciones, métodos de obtención y condiciones de procesamiento.

Nanocristales de celulosa de bagazo de agave (NCC)

El proceso para obtener nanocristales de celulosa de bagazo de agave comienza con la purificación de la celulosa para después continuar con hidrólisis ácida, centrifugación, diálisis y filtrado. El ácido más utilizado es el ácido sulfúrico en concentración aproximada de 65 %, un tiempo promedio de 45 minutos y 45 °C (Hernández et al., 2018). Los nanocristales de celulosa de bagazo de agave presentan dimensiones entre 25-45 nanómetros de diámetro y 85-195 nanómetros de longitud. En la Figura 7 se observa imágenes del microscopio de fuerza atómica (AFM), donde se observan nanocristales de celulosa de bagazo de agave. Es de notar que las cadenas individuales de celulosa se ensamblan por medio de puentes de hidrógeno para formar zonas altamente ordenadas. Como su nombre lo indica, presentan una alta cristalinidad en su estructura interna (Dufresne, 2013; Hubbe et al., 2008; Moon et al., 2011; Salas et al., 2014).

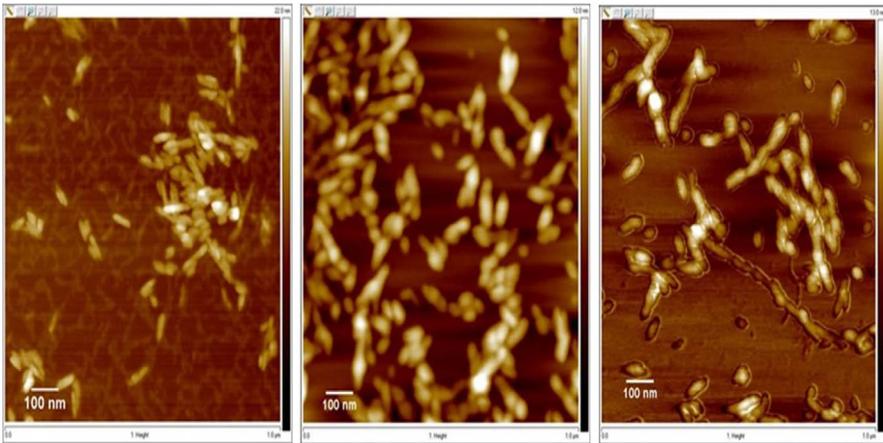


Figura 7. Imágenes AFM de NCC aislados de celulosa después del tratamiento con: a) Clorito de sodio, b) Hidróxido de sodio y c) organosolv (Imágenes tomadas de Hernández et al, 2018)

Nanofibras de celulosa de bagazo de agave (NFC)

La palabra “fibrilla” ha sido utilizada por varios investigadores para describir piezas relativamente largas y muy delgadas de material celulósico. Así, la palabra “nanofibra” ha tenido un uso cada vez mayor, en parte para evitar la ambigüedad. La palabra “nanofibra” también ayuda a enfatizar casos donde los materiales fibrosos celulósicos muy pequeños pueden mostrar comportamiento y funcionalidad que difiere de lo que se ha observado con las fibras celulósicas más grandes. En general, las nanofibras son los conjuntos elementales de distintas unidades poliméricas (basadas en la glucopiranososa en el caso de las nanofibrillas de celulosa) que pueden tener diámetros del orden de decenas de nanómetros y constituyen una red fibra/hilo con una relación de aspecto mayor a 1 (Hubbe et al., 2008). Las nanofibras de celulosa tienen diámetros de 5-70 nanómetros y longitudes en el orden de micrómetros.

Para la obtención de nanofibras de celulosa se sigue un procedimiento llamado fibrilación. Si las paredes celulares de las plantas son sometidas a acción mecánica suficiente, la estructura fibrilar original se rompe y se pueden obtener fibrillas en el orden de 10 a 100 nm de diámetro, mientras

que la longitud puede alcanzar la escala de micrómetros (Dufresne, 2013). El proceso generalmente comienza con la purificación de la celulosa y después continúa con fases de pretratamiento, acción mecánica y puede ser terminado con funcionalización especializada, gracias a la gran cantidad de grupos OH- (Palacios et al., 2019).

En general, las NFC, contienen tanto regiones cristalinas como regiones amorfas de cadenas individuales de celulosa ensambladas (Abdul Khalil et al., 2014; Dufresne, 2013; Hubbe et al., 2008; Moon et al., 2011; Salas et al., 2014). En la Figura 8 se observa la deconstrucción de las fibras en sus componentes nanométricos.

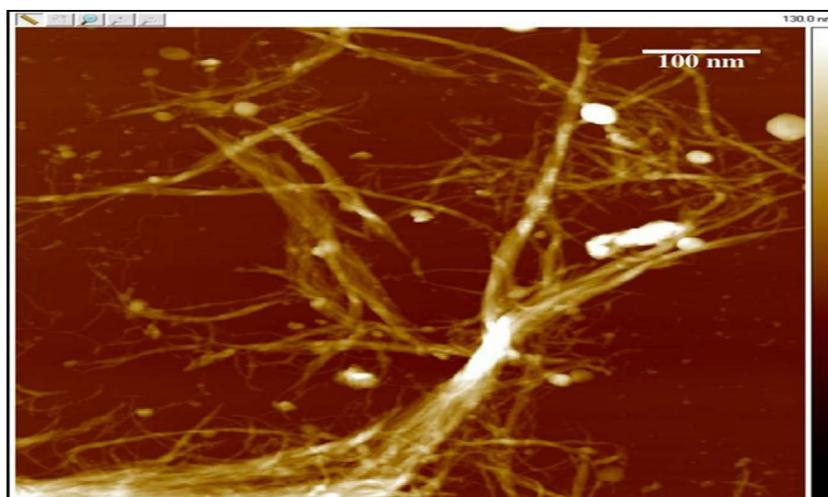


Figura 8. Imagen AFM de nanofibrillas de celulosa de bagazo (Imagen tomada de Palacios et al., 2019)

Existen muchos métodos para obtener nanofibras de celulosa, a continuación, se mencionan los dos métodos más utilizados para la obtención de NFC del bagazo de agave:

- **Microfluidizador:** La celulosa de bagazo purificada se prepara en una solución (1-2 % de consistencia) en un fluido polar. Esta solución es sometida en el equipo a alta presión, hasta 275 Mpa (1Mpa= 9.87 atm) a temperatura ambiente, y el equipo cuenta con intercambiador de calor. Se requiere pasar la solución por el equipo entre 10 y 20 ciclos. La

solución pasa por cámaras especialmente diseñadas en forma de “Z”. Se reportan 8.5kW de consumo de energía utilizando 10L de solución 1-2 wt. %, una presión de operación de 150 Mpa y 4 ciclos de operación, el consumo utilizando en 3 ciclos adicionales es de 14 875 kW al cambiar de fuente de celulosa. El factor clave se identifica como el número de ciclos (Palacios et al., 2019).

- Molino: La celulosa purificada se prepara en una solución (1-2 % de consistencia) en un fluido polar. Esta solución se pasa a través de un molino con 2 discos no porosos de cerámica girando hasta a 1500 rpm. Se requieren entre 10 y 20 ciclos para lograr diámetros entre los 20-90 nm (Abe et al., 2007; Taniguchi y Okamura, 1998). Esta técnica tiene inconvenientes, ya que se producen bultos de nanofibras y la distribución de los diámetros de las mismas es muy amplio (Dufresne, 2013).

Aplicaciones de nanocelulosa de bagazo de agave

Nanofibras

- Hidrogeles de poliácido acrílico-co-acrilamida/nanofibras de bagazo de agave. Martínez-Salcedo et al., (2021), sintetizaron hidrogeles con poli (ácido acrílico-co-acrilamida) reforzados con nanofibras de celulosa oxidada con TEMPO. Las nanofibras se aislaron del bagazo de Agave tequilana, mediante procesos de pulpeo y blanqueo seguidos de un tratamiento mecánico. Los hidrogeles que contenían nanofibras oxidadas con TEMPO mostraron una mayor capacidad de hinchamiento y una mayor rigidez que los hidrogeles que tenían nanofibras no tratadas. Estas mejoras se pueden atribuir a la naturaleza hidrofílica y altamente cristalina de las nanofibras de celulosa oxidada. El mejor equilibrio entre la capacidad de hinchamiento y las propiedades mecánicas se encontró en hidrogeles que contenían nanofibras sin blanquear y oxidadas con TEMPO a una concentración de 0.35 % en peso. La absorción de agua y la rigidez de los hidrogeles mejoraron gracias a la naturaleza hidrófila y rígida de las nanofibras de celulosa.
- Nanocompuestos Policaprolactona/Nanofibras de celulosa de agave. Palacios et al., (2020), prepararon membranas compuesta a base de

policaprolactona (PCL) y nanofibras de celulosa de bagazo de agave (NFC), esto lo realizaron a diferentes combinaciones de PCL y NFC utilizando el método de *electrospinning*, con el objetivo de desarrollar membranas orgánicas con buenas propiedades mecánicas para remover contaminantes del agua. El agua es un recurso de primera importancia para la vida y las actividades humanas. En este sentido, se utilizó celulosa obtenida del bagazo de agave y nanofibras de policaprolactona para preparar membranas que fueron probadas filtrando agua del grifo. Las membranas obtenidas presentaron una porosidad y estructura a escala nanométrica. Las variables de calidad del agua evaluadas luego de la filtración con las membranas PCL/NFC mostraron 100 % de remoción de turbidez, 100 % de conductividad y remoción de metales pesados del orden de 75 % a 99 % para hierro y cromo. Los resultados demostraron que las membranas NFC y PCL electro hiladas se pueden aplicar como un sistema de filtración “ecológico” para la purificación del agua.

- Emulsiones Pickering estabilizadas con nanofibrillas de celulosa parcialmente acetiladas. Sulbarán et al., (2020), obtuvieron nanofibrillas de celulosa del bagazo y modificaron por el método de acetilación. La acetilación química proporcionó nanofibrillas de celulosa con grupos éster superficiales, lo que hizo que el sistema fuera menos hidrofílico y plastificado. Las nanofibras acetiladas las caracterizaron por microscopía de fuerza atómica, carga electrostática, grado de sustitución (DS) y principales características químicas (espectroscopia infrarroja). Se mezclaron suspensiones acuosas de nanofibras parcialmente acetiladas (0.5% de concentración) con un disolvente orgánico no polar (tolueno) para obtener emulsiones estables durante al menos 43 días. Las nanofibrillas de celulosa de bagazo de agave formaron emulsiones con diferentes tamaños de gota, produciendo así una emulsión con diferentes propiedades y estabilidad. Las nanofibrillas de celulosa con tamaños más pequeños y un ángulo de contacto más alto (81°) generaron gotas pequeñas (10–60 nm), mientras que las nanofibrillas de celulosa con tamaños más grandes y un ángulo de contacto con el agua más pequeño (40°) generaron gotas más grandes (20–80 nm). Las nanofibras de bagazo de agave ofrecieron un gran potencial como estabilizadores de emulsiones Pickering, que se pueden considerar en los campos alimentario, cosmético y farmacéutico.

- Películas compuestas autoadhesivas basadas en nanofibras de celulosa y nanocristales de quitina como materiales antifúngicos. Robles et al., (2016), obtuvieron nanofibras de celulosa y nanocristales de quitina, dos componentes principales de los subproductos agrícolas y acuícolas, a partir de residuos industriales de agave variedad azul y langosta chata amarilla. Las nanofibras de celulosa se obtuvieron mediante homogeneización a alta presión, mientras que los nanocristales de quitina se obtuvieron mediante hidrólisis en medio ácido. Las nanofibras de celulosa y los nanocristales de quitina se caracterizaron por difracción de rayos X, microscopía de fuerza atómica y espectroscopia infrarroja. Se fabricaron películas compuestas autoadhesivas con diferente composición mediante prensado en caliente y se evaluaron sus propiedades. La actividad antifúngica de los nanocristales de quitina se estudió con un Cellometer® dispositivo de conteo celular, las propiedades mecánicas a tensión se midieron con una máquina de ensayo universal, la permeabilidad al vapor de agua se evaluó con un termohigrómetro y la tensión superficial con el método de ángulo de contacto de gota sésil. Como resultados obtuvieron que la adición de nanocristales de quitina redujo ligeramente las propiedades mecánicas del compuesto, y que la presencia de nanocristales de quitina influyó en el crecimiento del hongo *Aspergillus sp* en la superficie de los compuestos como se esperaba.

Nanocristales

- *Refuerzo para hidrogeles con nanocristales de celulosa de agave (NCC)*. Se prepararon hidrogeles de poli (ácido acrílico/acrilamida) (AA/AM), (80/20 p/p), reticulados con NN-metilen bisacrilamida (MBA) en niveles de adición de 1, 2, 4 y 8 % en peso de la fase monomérica. El NCC se adicionó al 0.1, 0.5 y 1.0 % en peso. Se utilizaron dos rutas de síntesis. En la primera ruta, la polimerización se realizó inmediatamente después de mezclar los componentes. En la segunda vía, la mezcla de los componentes se mantuvo a $2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 h antes de la polimerización (tratamiento térmico). Las partículas de NCC tenían un diámetro de aproximadamente 75 nm. Los hidrogeles que fueron sometidos al tratamiento térmico alcanzaron el equilibrio después de aproximada-

mente 72 h. Los hidrogeles no tratados alcanzaron el equilibrio después de aproximadamente 58 h. Las muestras tratadas térmicamente tenían un grado de hinchamiento más bajo y el grado de hinchamiento disminuyó a medida que aumentaba el grado de reticulación y la concentración de NCC. La cinética de hinchamiento siguió el pseudosegundo orden de Schott (Jimenez-Amezcu et al., 2021).

- *Como aditivos en Biocomposites.* Se fabricaron biocomposites de Poliacido láctico (PVA)/Nanocristales de celulosa en cantidades de 0.1, 0.3 y 0.5 %, por medio de un proceso de termo compresión. Los NCC obtenidos del bagazo de *Agave tequilana*, actúa como material de refuerzo en matrices de PLA, aumentando considerablemente la resistencia a la tensión y a la flexión. Este material puede ser utilizado en la manufactura de productos desechables de mayor calidad y debido a su carácter biocompatible la hace idónea para su uso en productos biomédicos (González-Ramírez et al., 2019a).

En un trabajo anterior, Pech-Cohuo et al., (2018), reportaron la producción y modificación superficial de nanocristales de celulosa (NCC) a partir de *Agave tequilana*. Se investigaron los residuos de Weber (ATW) y su efecto sobre la reología de fusión del PLA. Para ello, se obtuvieron NCC a partir de residuos de ATW por hidrólisis ácida y se injertaron con acrilato de 2-etilhexilo (2-EHA) para promover la compatibilidad con polímeros no polares, como el PLA. La morfología de NCC se presentó como varillas, esferas y la llamada red porosa fue observada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de transmisión de electrones (TEM), la cristalinidad de las fibras de celulosa fue ~73 % y aumentó hasta ~94 % para NCC seguido de difracción de rayos X (XRD).

Por su parte, Robles et al., (2015), reportó la obtención de Nanocelulosa modificada superficialmente como refuerzo en poli (ácido láctico) evaluaron el desempeño de dos modificaciones superficiales diferentes sobre nanopartículas de celulosa obtenidas a partir de bagazo de agave. Las nanofibras de celulosa se obtuvieron mediante métodos mecánicos tradicionales y los nanocristales de celulosa se obtuvieron mediante hidrólisis con ácido sulfúrico. Después de la extracción de la celulosa y reducción de tamaño, se elaboraron diferentes compuestos utilizando poli

(ácido láctico) como matriz variando las concentraciones de fibra y utilizando partículas celulósicas de diverso tamaño y modificación superficial (nanofibras de celulosa silanizada con 3-aminopropiltriethoxisilano y nanocristales de celulosa esterificada con cloruro de dodecanoilo).

- *Soporte de nanopartículas.* El estudio de nanopartículas metálicas (NPsM) ha crecido inmensamente en los últimos años, debido a su amplio rango de aplicaciones en las áreas de biosensores, nanocatálisis, medicina, etc., en donde se buscan alternativas sustentables y de química verde para su síntesis. En este sentido, González-Ramírez et al., (2019 b), extrajeron NCC mediante un pulpeo alcalino con NaOH y antraquinona en un reactor rotatorio a presión, seguido de seis ciclos de blanqueo y una hidrólisis ácida utilizando ácido sulfúrico. La síntesis de NPsM ancladas en la superficie de los NCC se llevó a cabo mediante la reducción de HAuCl_4 o AgNO_3 por citrato de sodio o borohidruro de sodio en solución acuosa.

Perspectivas

Aunque la tendencia sobre el manejo del bagazo de agave ha sido el compostaje, se espera que se adopten otras tecnologías tendientes al aprovechamiento de la celulosa, hemicelulosa y lignina, constituyentes principales del bagazo. Una de estas tecnologías, cuando llegue a ser competitiva, pudiera ser la producción de nanocelulosa (nanofibras o nanocristales) para potencializar sus diversos usos. Los potenciales mercados de la nanocelulosa de bagazo de Agave Tequilería Weber son muy grandes, ya que el abanico de posibilidades que se abre a la hora de enumerar los usos de la nanocelulosa es casi infinito. Desde usarlo para conservar frutas y verduras, hasta incluso ser utilizada en la industria automotriz. Este material renovable y sostenible está aún muy subutilizado y nuevas aplicaciones están en desarrollo.

Conclusiones

El creciente interés por el consumo de tequila a nivel mundial, ha incrementado la demanda de esta bebida mexicana. En consecuencia, cada año se genera una cantidad significativa de residuos de bagazo de agave que no

tienen un uso tecnificado por la nula regulación, y su disposición final se convierte en un problema por el impacto negativo generado al medioambiente. Sin embargo, este residuo está constituido por 3 biopolímeros (celulosa, hemicelulosa y lignina) que recientemente han tomado relevante importancia a nivel industrial, por su gran potencial de biotransformación en productos de importancia económica.

En particular, la celulosa presenta un espectro amplio para la obtención de bioproductos de alto valor agregado, y cuando se lleva a escala nanométrica aumenta su interés para la producción de materiales compuestos debido a sus dimensiones, área superficial, cristalinidad, resistencia mecánica, biodegradabilidad, etc. Convirtiendo a las NFC y NCC obtenidos del bagazo de agave, en un pilar para la incorporación eficiente de la biomasa dentro de la bioeconomía y el desarrollo regional. En este sentido, es importante continuar realizando investigaciones que conlleven a la valoración y aprovechamiento de estos subproductos de la industria tequilera para que su transformación contribuya con el reintegro de los residuos a la cadena productiva, aunado a la reducción de la huella ambiental.

Referencia

- Abdul Khalil, H. P. S., Davoudpour, Y., Islam, M. N., Mustapha, A., Sudesh, K., Dungani, R., & Jawaid, M. (2014). Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review. *Carbohydrate Polymers*, 99, 649-665. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.069>
- Abe, K., Iwamoto, S., & Yano, H. (2007). Obtaining cellulose nanofibers with a uniform width of 15 nm from wood. *Biomacromolecules*, 8(10), 3276-3278.
- Alemán-Nava, G. S., Gatti, I. A., Parra-Saldivar, R., Dallemard, J.-F., Rittmann, B. 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.134>
- Bautista, J., M., García, O., L., Barboza-Corona, J. E., & Parra, N., L. A. (2001). *El agave tequilana Weber y la producción de tequila*. Acta Universitaria (agosto), 26-34.

- Bowen, S., & Zapata, A. V. (2009). Geographical indications, terroir, and socioeconomic and ecological sustainability: The case of tequila. *Journal of rural studies*, 25(1), 108-119.
- CRT. (2019). Consejo Regulador del Tequila. 06 de junio Retrieved from <https://www.crt.org.mx/index.php/en/>
- Del Real L., J. I. (2019). Agave, materia prima del Tequila. En *Manual Técnico del Tequilero*. Primera edición. Guadalajara, México. pag 128-157. https://www.crt.org.mx/images/Documentos/Manual_Tecnico_Tequilero/ManualTecnicoTequilero%20ImpresionAlta.pdf
- Domínguez, V. D. J. F. P., del Real Laborde, J. I., Murphy, K. F. B., Ríos, S. J. C., & Díaz, M. L. S. (2007). *Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de Agave Tequilana Weber en la zona de denominación de origen del tequila*.
- Dufresne, A. (2013). *Nanocellulose: from nature to high performance tailored materials: Walter de Gruyter*.
- García Mendoza, A. (2007). Los agaves de México. *Ciencias* (087).
- Gallardo-Sánchez, M. A., Hernández, J. A., Casillas, R. R., Vazquez, J. I. E., Hernández, D. E., Martínez, J. F. A. S., García-Enriquez, S., & Balleza, E. R. M. (2019). Obtaining Soluble-grade cellulose pulp from Agave tequilana Weber var. Azul Bagasse. *BioResources*, 14(4), 9867-9881.
- Gobeille, A., Yavitt, J., Stalcup, P., & Valenzuela, A. (2006). Effects of soil management practices on soil fertility measurements on Agave tequilana plantations in Western Central Mexico. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 80-88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.033>
- González Hernández, L. H. (2013). *Obtención de los nutraceuticos presentes en la piña de agave tequilero mediante dilución diferencial*.
- González-Ramírez J.R., Rosales-Rivera L. C., Rabelero-Velasco M., Figueroa-Ochoa E. B., Escobar-Hernández D., Soltero-Martínez J. F. A., García-Enríquez S, y Macías-Balleza E. R. (2019a) *Obtención y modificación de nanocristales de celulosa de bagazo de Agave tequilana Weber variedad azul y su uso en matrices poliméricas*. Memorias del XL Encuentro Nacional de la AMIDIQ. 206-209.
- González-Ramírez, J. R.; Rabelero-Velasco, M.; Rosales-Rivera, L. C; Figueroa-Ochoa, E. B.; Soltero-Martínez, J. F. A.; García-Enríquez, S.; Lomelí-Rosales, D. A. § Macías-Balleza, E. R. (2019b). *Modificación quím*

- mica de nanocristales de celulosa de bagazo de Agave Tequilana Webber variedad azul como soporte de nanopartículas metálicas*. Memorias del IX Encuentro de Química Inorgánica. 481-484
- Hernández, J. A., Romero, V. H., Escalante, A., Toriz, G., Rojas, O., & Sulbarán-Rangel, B. (2018). Agave tequilana bagasse as source of cellulose nanocrystals via organosolv treatment. *BioResources*, 13(2), 3603-3614. doi:<https://doi.org/10.15376/biores.13.2.3603-3614>
- Hubbe, M. A., Rojas, O. J., Lucia, L. A., & Sain, M. (2008). CELLULOSIC NANOCOMPOSITES: A REVIEW. *BioResources*, 3(3), 929-980.
- Iñiguez-Covarrubias, G., Lange, S. E., & Rowell, R. M. (2001). Utilization of byproducts from the tequila industry: part 1: agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard production. *Bioresource Technology*, 77(1), 25-32. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00137-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00137-1)
- Idarraga, G., Ramos, J., Zuñiga, V., Sahin, T., & Young, RA (1999). Pulpa y papel a partir de desechos de agave azul de la producción de tequila. *Revista de química agrícola y alimentaria*, 47 (10), 4450-4455.<https://doi.org/10.1021/jf990045n>
- Iñiguez C., G., Aguilera C., M. C., Esearte L., A. N., Iñiguez F., F. M., Bernal C., J. J., RamírezM., W., Villavazo N., J. (2019). Opciones sustentables de manejo y aprovechamiento del bagazo de agave y vinazas. En *Manual Técnico del Tequilero*. Primera edición. Guadalajara, México. pag 525-551. https://www.crt.org.mx/images/Documentos/Manual_Tecnico_Tequilero/ManualTecnicoTequilero%20-ImpresionAlta.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, & Consejo Agroalimentario de Jalisco. (2019). *Colección de estudios sectoriales y regionales. Conociendo la Industria del Tequila y el Mezcal*. Retrieved from https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825189600.pdf
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). *Indicadores de producción agrícola por estados*. Retrieved from: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0&ind=681144>
- Jiménez-Amezcuca M., R., Josep Villanueva-Silva, R., Octavio Muñoz-García, R., Rebeca Macías-Balleza, E., Helena Sydenstricker Flores-Sahagún, M. T., Lomelí-Ramírez, M. G. & Garcia-Enriquez, S. (2021). Preparation of Agave tequilana Weber Nanocrystalline Cellulose and its Use as Reinforcement for Acrylic Hydrogels. *BioResources*, 16(2).

- Kestur G, S., Flores-Sahagun, T. H. S., Dos Santos, L. P., Dos Santos, J., Mazzaro, I., & Mikowski, A. (2013). Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 45, 153-161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.09.001>
- Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., & Stroeve, P. (2009). *Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713-3729. doi:10.1021/ie801542g
- Lomelí-Ramírez, M. G., Valdez-Fausto, E. M., Rentería-Urquiza, M., Jiménez-Amezcuca, R. M., Anzaldo Hernández, J., Torres-Rendon, J. G., & García Enriquez, S. (2018). *Study of green nanocomposites based on corn starch and cellulose nanofibrils from Agave tequilana Weber*. *Carbohydrate Polymers*, 201, 9-19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.045>
- Montaño-Leyva, B., Rodríguez-Félix, F., Torres-Chávez, P., Ramírez-Wong, B., López-Cervantes, J., & Sánchez-Machado, D. (2011). Preparation and characterization of durum wheat (*Triticum durum*) straw cellulose nanofibers by electrospinning. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(3), 870–875. <https://doi.org/10.1021/jf103364a>
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941-3994. doi:10.1039/C0CS00108B
- Palacios Hinstroza, H., Hernández Diaz, J. A., Esquivel Alfaro, M., Toriz, G., Rojas, O. J., & Sulbarán-Rangel, B. C. (2019). Isolation and Characterization of Nanofibrillar Cellulose from Agave tequilana Weber Bagasse. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 1-7. doi:<https://doi.org/10.1155/2019/1342547>
- Palacios Hinstroza, H., Urena-Saborio, H., Zurita, F., Guerrero de León, A. A., Sundaram, G., & Sulbarán-Rangel, B. (2020). Nanocellulose and Polycaprolactone Nanospun Composite Membranes and Their Potential for the Removal of Pollutants from Water. *Molecules*, 25(3), 683. doi:10.3390/molecules25030683
- Pech-Cohuo, S. C., Canche-Escamilla, G., Valadez-González, A., Fernández-Escamilla, V. V. A., & Uribe-Calderon, J. (2018). Production and modification of cellulose nanocrystals from Agave tequilana weber waste and its effect on the melt rheology of PLA. *International Journal*

- of *Polymer Science*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3567901>
- Pérez Domínguez J.F. y J.I. del Real Laborde, (editores) 2007. *Conocimientos y prácticas agronómicas para la producción de Agave tequilana Weber en la zona de denominación de origen del Tequila*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro. Tepatitlán de Morelos, Mexico. Pag. 9-10. http://www.inifapcirne.gob.mx/Revistas/Archivos/agave_final_baja%20resolucion.pdf
- Pinal, Z. L. y A. Gschaedler M. (1998). La Etapa de Fermentación y la Generación de Compuestos Organolépticos. *Bebidas Mexicanas* 7(1) 10-12.
- Robles, E., Fernández-Rodríguez, J., Barbosa, AM, Gordobil, O., Carreño, NL, & Labidi, J. (2018). Producción de nanopartículas de celulosa a partir de residuos de agave azul tratados con procesos amigables con el medio ambiente. *Polímeros de carbohidratos*, 183, 294-302.
- Robles, E., Urruzola, I., Labidi, J., & Serrano, L. (2015). Nanocelulosa modificada superficialmente como refuerzo en poli (ácido láctico) para conformar nuevos composites. *Cultivos y productos industriales*, 71, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.075>
- Robles-García, M. Á., Del-Toro-Sánchez, C. L., Márquez-Ríos, E., Barrera-Rodríguez, A., Aguilar, J., Aguilar, J. A., Rodríguez-Félix, F. (2018). Nanofibers of cellulose bagasse from *Agave tequilana* Weber var. azul by electrospinning: preparation and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 192, 69-74. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.058>
- Robles, E., Salaberria, AM, Herrera, R., Fernandes, SC, & Labidi, J. (2016). Películas compuestas autoadhesivas a base de nanofibras de celulosa y nanocristales de quitina como materiales antifúngicos. *Polímeros de carbohidratos*, 144, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.02.024>
- Salas, C., Nypelö, T., Rodriguez-Abreu, C., Carrillo, C., & Rojas, O. J. (2014). Nanocellulose properties and applications in colloids and interfaces. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 19(5), 383-396. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cocis.2014.10.003>
- Sulbarán-Rangel, B., Hernández Díaz, J. A., Guzmán González, C. A., & Rojas, O. J. (2020). Partially acetylated cellulose nanofibrils from *Agave tequilana* bagasse and Pickering stabilization. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 1-9. doi:<https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1858855>

- Taniguchi, T., & Okamura, K. (1998). New films produced from microfibrillated natural fibres. *Polymer International*, 47(3), 291-294.
- Vázquez-Acosta, A., Treviño-Carreón, J., Estrada-Drouaillet, B., García-Alanis, M. L., Herrera-Monsiváis, M. C., & Tristán, V. V. (2020). Morphological Characterization of Agave tequilana Weber Variety azul (Asparagaceae) under Cultivation in the Municipality of Llera, Tamaulipas, Mexico. *Open Journal of Forestry*, 10(2), 264-275. DOI: 10.4236/ojfor.2020.102017
- Warren-Vega, W. M., Aguilar-Hernández, D. E., Zárate-Guzmán, A. I., Campos-Rodríguez, A., & Romero-Cano, L. A. (2022). Development of a Predictive Model for Agave Prices Employing Environmental, Economic, and Social Factors: Towards a Planned Supply Chain for Agave-Tequila Industry. *Foods*, 11(8), 1138.
- Zamora Natera, F., Ruiz López, M. A., García López, P. M., Rodríguez Macías, R., Iñiguez Covarrubias, G., Salcedo Pérez, E., & Alcantar González, E. G. (2010). Caracterización física y química de sustratos agrícolas a partir de bagazo de agave tequilero. *Interciencia*, 35(7), 515-520.
- Zurita, F., Tejeda, A., Montoya, A., Carrillo, I., Sulbarán-Rangel, B., & Carreón-Álvarez, A. (2022). Generation of Tequila Vinasses, Characterization, Current Disposal Practices and Study Cases of Disposal Methods. *Water*, 14(9), 1395.