



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL VALLE DE TOLUCA

UNIDAD ACADÉMICA DE CAPULHUAC

**DIRECCION DE LAS CARRERAS DE PROCESOS ALIMENTARIOS Y
QUÍMICA ÁREA BIOTECNOLOGÍA**

NOMBRE DEL PROYECTO:

**Métodos de extracción de nanocelulosa a partir de
residuos de *Agave* spp.**

MEMORIA

PARA OBTENER EL TITULO DE:

**TÉCNICO SUPERIOR UNIVERSITARIO EN QUÍMICA ÁREA
BIOTECNOLOGÍA**

PRESENTA:

HIRAM VIDALES CARRILLO

GENERACIÓN

SEPTIEMBRE 2017 - AGOSTO 2019

Lerma, Estado de México, Agosto del 2019.

Índice

1. Planteamiento del problema	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
2. Marco teórico	5
2.1. Celulosa	5
2.2. Fuentes de celulosa	8
2.3. Agave	10
2.3.1. Bebidas alcohólicas	12
2.3.2. Residuos obtenidos de los procesos de fabricación de tequila, mezcal y pulque.	16
2.4. Nanocelulosa	20
2.4.1. Propiedades de la nanofibrillas y nanocristales de celulosa	22
2.4.2. Aplicaciones de la nanocelulosa	24
2.4.3. Método de extracción de nanocelulosa	30
3. Materiales y métodos	30
3.1. Preparación de muestras	30
3.2. Aislamiento de celulosa	31
3.3. Blanqueo total sin cloro	32
3.4. Producción de nanocelulosa	33
3.5. Hidrólisis ácida mejorada con sonicación	33
3.6. Desfibrilación mecánica	34
3.7. Caracterización de las fibras	35
4. Conclusión	39
Referencias	40

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama esquemático de la estructura de una fibra.....	5
Figura 2. Estructura de la macromolécula de celulosa.....	6
Figura 3. Representación esquemática de la celdilla unidad de las estructuras I α (a) y I β (b) de la celulosa, donde puede apreciarse que el desplazamiento de los enlaces de hidrógeno en I α es de +C/4 y en I β va alternando +C/4 y – C/4.....	7
Figura 4. Representación de los procesos de obtención de los diferentes polimorfos de la celulosa nativa.....	8
Figura 5. Componentes químicos de las fuentes de pasta y papel (%)......	9
Figura 6. Estructura morfológica del agave.....	11
Figura 7. Proceso de jimado y cosecha del agave tequilero: A) Superficie cultivada con <i>Agave tequilana</i> * B) Planta de <i>A. tequilana</i> seleccionada para la jima** C) Productor extrayendo el <i>A. tequilana</i> y retirando las pencas de la piña*** D) Piña (bola) una vez terminado el proceso de jimado****.....	13
Figura 8. Proceso de elaboración de mezcal.....	14
Figura 9. Proceso de elaboración de pulque.....	16
Figura 10. Representación de operaciones unitarias, subproductos y producto final obtenido en la producción de mezcal.....	17
Figura 11. Formas de celulosa mediante microscopio electrónico: a) Nanofibrillas y b) Nanocristales.....	21
Figura 12. Representación esquemática de las nanofibrillas y nanocristales de celulosa. a) Estructura hipotética donde se muestra la microfibrilla constituida por regiones cristalinas y amorfas, b) nanocristales de celulosa resultantes tras disolver las regiones amorfas mediante hidrólisis ácida.....	21
Figura 13. Textura de los cristales líquidos de nanocristales de celulosa visto en un microscopio de luz polarizada. Escala 200 nm.....	24
Figura 14. Algunas aplicaciones biomédicas de la nanocelulosa (NC).....	26

Figura 15. Aplicación de la nanocelulosa en medicina y en matearles, a) aplicación de medicamentos de lenta liberación, b) aplicaciones subcutáneas, c) refracción de la luz a través de un vidrio común y d) refracción de la luz a través de la nanocelulosa.....	27
Figura 16. Aplicación de chip de nanocelulosa.....	28
Figura 17. Esquema de proceso de biorrefinería de Organosolv-etanol.....	32
Figura 18. Esquema de proceso moderno de blanqueamiento ECF. 1) Etapa de oxígeno alcalino, 2) Etapa de peróxido con una reacción de quelación secundaria, 3) Etapa de peróxido alcalino y 4) secado.....	33
Figura 19. Diagrama de flujo visual de los procesos de producción de CNC/CNF.....	34

Índice de tablas

Tabla 1. Composición química de las fibras del bagazo en tres especies de agave.....	18
Tabla 2. Composición química de las fibras de las pencas en tres especies de agave.....	19
Tabla 3. Tipos de nanocelulosa, sinónimos y rangos característicos de dimensiones nanocelulosa, para cada tipo.....	22

MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE NANOCELULOSA A PARTIR DE RESIDUOS DE AGAVE SPP.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

En México la producción de tequila y mezcal se ve incrementado por la demanda que existe a escala nacional e internacional de estas dos bebidas alcohólicas y en menos escala lo que es la producción de pulque; al obtener el tequila, mezcal y el pulque se generan ciertos residuos durante y después de la producción.

Conforme lo registrado por el Consejo Regulador de Tequila (CRT) y el Consejo Regulador del Mezcal (CRM) en el 2018, la producción fue en total de 309,100,000 L de tequila y 5,100,000 L de mezcal; y debido a esto la demanda del cultivo de agaves se acrecentó, siendo de 1,138,800,000 ton de *Agave tequilana* var azul para producción de tequila y 76,500,000 ton de *Agave* spp. Basado en estos datos se estimó que la industria tequilera y mezcalera produjo aproximadamente 766,371,000 ton de bagazo, un residuo generado de la extracción del jugo de la piña del agave. Estas industrias tratan de reutilizar el bagazo producido para darle diversos usos como: materiales de construcción que pueden ser aglomerados, tejas, láminas, entre otros. También se ha realizado la incorporación del bagazo para elaborar cartón, papel, corcho, que les permita reutilizar el bagazo y evitar que se vaya a los basureros o que termine abandonado en los campos.

Por otra parte, el pulque también es una bebida importante en México, sin embargo su consumo se limita a ser nacional; el Servicio de Información Agroalimentación y Pesquera (SIAP) reportó que en el 2018 la producción de pulque fue de 186,300,000 L en el país, para esta cantidad de producción se requiere de 9,315,000 kg de agave, lo que a su vez produce residuos que sólo son empleados como composta pero la mayoría son abandonados sin manejo alguno.

1.2. Justificación

Uno de los materiales que ha tomado importancia en el último siglo es la nanocelulosa, debido a sus propiedades únicas puede ser capaz de remplazar a todos aquellos materiales que generan problemas actualmente, más aún es uno de los compuestos más abundantes de la superficie de la tierra, este material se puede extraer de todas las plantas siendo el agave y todas su morfología un buen candidato para la obtención de nanocelulosa; e incluso también su extracción es posible de animales y bacterias; debido a esto hace que su obtención sea más sencilla que el acero o algún otro metal. Al igual que otros materiales, la nanocelulosa necesita una serie de procesos para llegar a obtenerla de manera pura y con ello la obtención de otros compuestos que tienen un impacto ambiental.

La eliminación de lignina contenida en las fibras lignocelulósicas es el primer paso en la obtención de celulosa y luego con ello obtener nanocelulosa. Industrialmente, la pulpa de celulosa se obtiene mediante dos etapas: pulpado y blanqueado. El método más comúnmente usado es el proceso Kraft, que proporciona altos rendimientos de pulpa, pero puede generar derivados de sulfuro que pueden estar vinculados a la celulosa y representar un problema ambiental durante la eliminación. En este sentido, en las últimas décadas han surgido procesos de fabricación de pasta respetuosos con el medio ambiente, como los métodos de Organosolv (OT). Además, el proceso de Organosolv es un método libre de azufre, basado en la extracción de lignina por su disolución en disolventes orgánicos a alta temperatura y presión, la baja viscosidad de los licores blancos de Organosolv favorece la penetración en las fibras, permitiendo que una alta cantidad de lignina sea fraccionada y de esta manera pueda ser disuelta. Además, después de la etapa de fabricación de pasta, el disolvente podría recuperarse por destilación.

Después de la pulpa, parte de la lignina residual permanece en las fibras y generalmente se elimina en reacciones de blanqueo oxidativo. Durante muchos años, las principales reacciones de blanqueo han involucrado reactivos clorados (Cl_2 , ClO_2 y NaOCl), pero hoy en día se evita el cloro en la mayoría de los tipos de

pasta debido a sus efectos ambientales negativos. Las secuencias de blanqueo actuales incluyen el uso de dióxido de cloro en secuencias libres de cloro elemental (ECF). La otra familia de secuencias de blanqueo es el blanqueo sin cloro total (TCF, por sus siglas en inglés), que evita la liberación de derivados de cloro en las corrientes de desechos o en la atmósfera. La degradación residual de la lignina con peróxido de hidrógeno se basa en la acción de los radicales producidos durante las transferencias de un solo electrón entre el peróxido de hidrógeno y los catalizadores o como resultado de la escisión térmica del enlace oxígeno-oxígeno. Se han hecho algunos enfoques para ensamblar la fabricación de pulpa de base orgánica con secuencias de blanqueo de TCF para desarrollar procesos de extracción de celulosa más ecológicos, sin embargo, hasta ahora, los investigadores han incluido el uso de productos químicos (ácido acético, HCl, antraquinona, metanol, entre otros.) que pueden encajar en los procesos de Organosolv (solvente orgánico) pero no en los procesos respetuosos con el medio ambiente. Por lo tanto, para obtener una pulpa de celulosa totalmente verde se considera cambiar los procesos de extracción de celulosa para evitar el uso de sustancias nocivas al ambiente y obtener de esta manera nanocelulosa amigable con el medio ambiente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Seleccionar un método de extracción de nanocelulosa en *Agave tequilana* Weber, *A. salmiana* y *A. angustifolia*, a partir de una revisión teórica, que sea amigable con medio ambiente

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión literaria acerca de los procesos de extracción de nanocelulosa
- Conocer los diversos usos que se le dan a los Agaves: *Agave tequilana* Weber, *A. salmiana* y *A. angustifolia*.
- Investigar el impacto que tiene la producción de tequila, mezcal y pulque.
- Comparar métodos de extracción de nanocelulosa a partir de la revisión teórica y seleccionar un método que sea amigable con el medio ambiente.

2. Marco teórico

2.1. Celulosa

Las fibras vegetales están compuestas principalmente por celulosa, lignina, hemicelulosa y extractos (Figura 1). La hemicelulosa es un polímero de glucosa de cadena corta y de bajo peso molecular que sirve como agente conector entre las microfibrillas de celulosa proporcionando reforzamiento estructural a la pared celular de las plantas. La lignina es un material amorfo que actúa como cemento entre los filamentos de celulosa. Los extractivos incluyen grasas, ceras, resinas, proteínas, gomas, terpenos y azúcares simples, que pueden ser removidos con solventes orgánicos o agua, y funcionan como reservas de energía o contra ataques bacterianos. Los extractos tienen gran influencia sobre las propiedades físicas como color, olor y resistencia a la pudrición de las fibras (Pech, 2018).

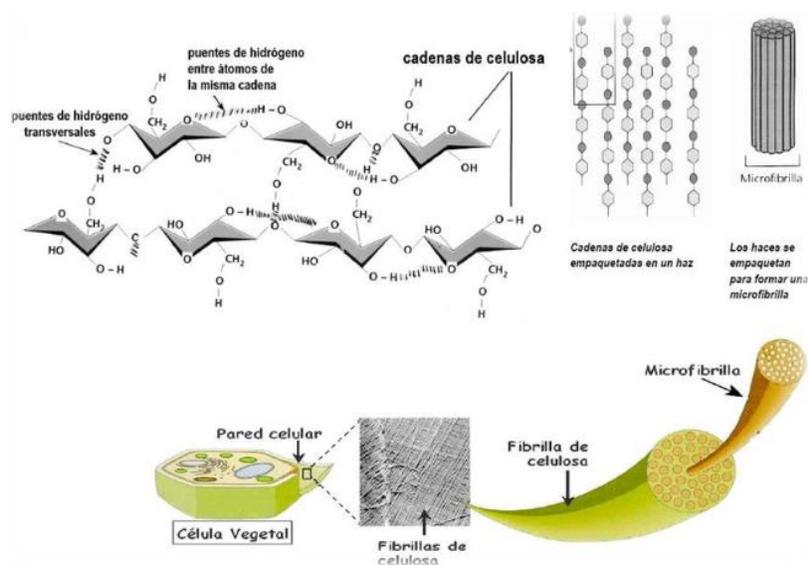


Figura 1. Diagrama esquemático de la estructura de una fibra (Rosas, 2016).

La celulosa es un polímero lineal de β -anhidroglucopiranosido con uniones 1,4 β -glicosídicos. La fórmula general es $(C_6H_{10}O_5)_n$ (Figura 2), su densidad es 1.50 g/cm^3 . La macromolécula de celulosa se conforma por cientos a millones de

unidades de glucosa dependiendo de su fuente. Los grupos –OH en la cadena de celulosa forman enlaces de hidrogeno entre las moléculas. Estos enlaces forman paquetes de estructuras cristalinas llamadas microfibrillas, que son las que constituyen las fibras de celulosa. Los grupos –OH representan sitios activos para las modificaciones químicas como la esterificación (Rosas, 2016).

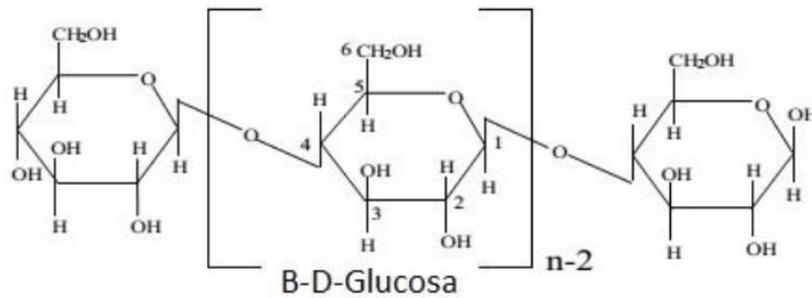


Figura 2. Estructura de la macromolécula de celulosa (Pech, 2018).

La agregación entre fibras se produce mediante fuerzas de Van der Waals y la unión intra- e inter-molecular se lleva a cabo mediante enlaces de hidrogeno. Existen regiones amorfas distribuidas a lo largo de la fibra elemental o microfibrilla (Figura 1) que produce una desviación en pequeños segmentos a lo largo de ésta dando lugar a una distorsión de la estructura de la microfibrilla por tensiones internas, lo que origina que se inclinen y retuerzan (Figura 3). En las regiones cristalinas las cadenas de celulosa se encuentran fuertemente empaquetadas y estabilizadas por una densa red de enlaces de hidrogeno. La orientación molecular y la red de estos enlaces pueden variar dando lugar a varios alomorfos de celulosa, predominando unos u otros en función del origen de la celulosa, y del método de extracción empleado. Se han identificado seis polimorfos de la celulosa I , II , III_I , III_{II} , IV_I y IV_{II} . La celulosa nativa, presenta a su vez dos alomorfos, denominados l_α y l_β . El l_α es el predominante en algas y bacterias, y l_β en plantas superiores (Figura 3) (González, 2017).

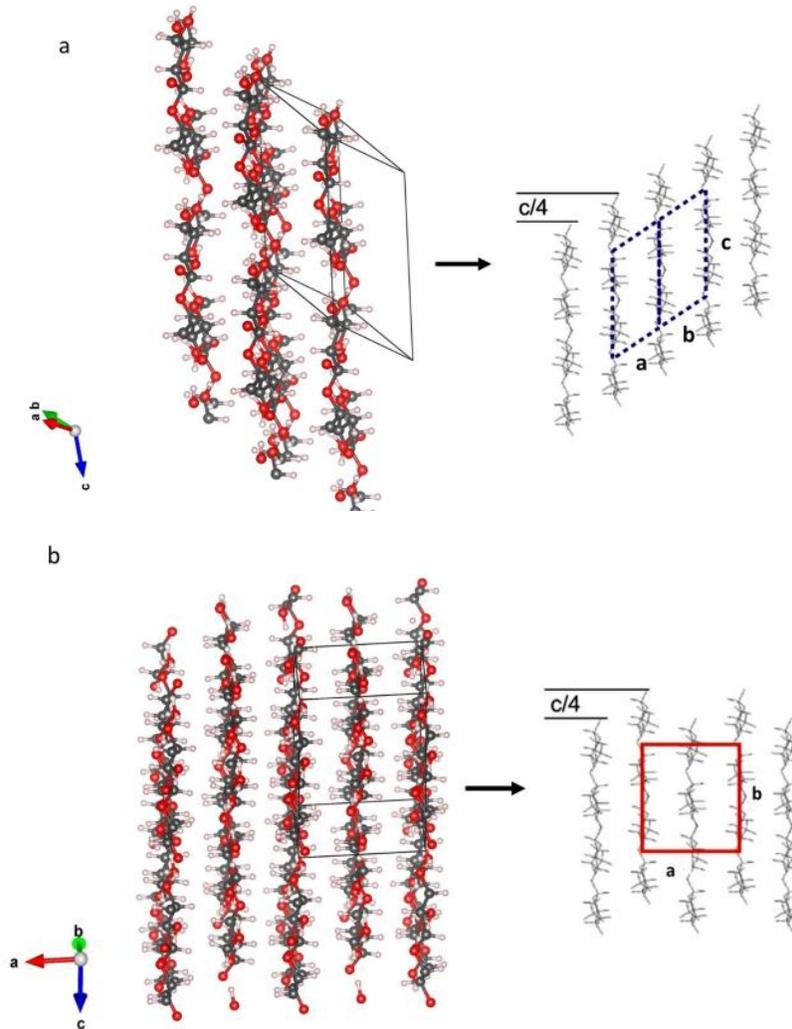


Figura 3. Representación esquemática de la celdilla unidad de las estructuras I α (a) y I β (b) de la celulosa, donde puede apreciarse que el desplazamiento de los enlaces de hidrógeno en I α es de $+C/4$ y en I β va alternando $+C/4$ y $-C/4$ (González, 2017).

I α es una fase metaestable que puede convertirse en I β , la fase termodinámicamente estable a temperatura ambiente, mediante un incremento de la temperatura en diferentes medios. El resto de polímeros son obtenidos tras someter la celulosa a diferentes tratamientos. La celulosa II se obtiene después de la recristalización o regeneración con hidróxido sódico de la celulosa I. La celulosa III_I y III_{II} son obtenidas tras el tratamiento de las celulosas I y II con amoníaco líquido seguido de evaporación (proceso reversible). Finalmente, los polímeros IV_I y IV_{II} son derivados de las celulosas III_I y III_{II}, respectivamente, tras ser calentadas a 206°C en glicerol (Figura 4).

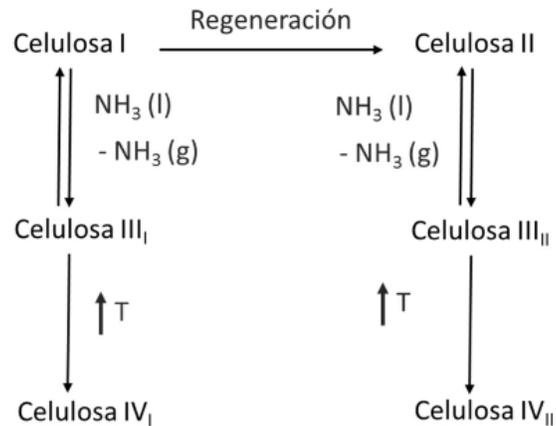


Figura 4. Representación de los procesos de obtención de los diferentes polimorfos de la celulosa nativa (González, 2017).

2.2. Fuentes de celulosa

Madera. La madera es una muy abundante fuente de celulosa, su principal uso es en la elaboración de la pulpa de celulosa, mueble, lápices, juegos y papel. Los materiales típicos son pulpas Kraft blanqueadas y pulpas disueltas (usadas para la producción de productos de celulosa regenerada como el Rayón). La madera está constituida de entre 40-60% de celulosa (Kamide, 2005).

Se estima que para realizar 1 kg de hojas de papel, se requieren 3.7 kg de pasta de celulosa. Aproximadamente, un árbol produce 245 kg de pasta de celulosa; entonces si una fábrica elabora 1 tonelada de hojas de papel requiere de 3,700 kg de pasta de celulosa, por lo tanto, necesita 15 robles con una altura de 23 m, una anchura de 7.5 m de circunferencia y un peso 550.28 kg cada uno aproximadamente (<https://www.bioenciclopedia.com/roble-comun/>, 2015; Moscoso, 2013).

	Maderas blandas	Maderas duras	Paja	Bambú	Algodón
Carbohidratos					
α -celulosa	38–46	38–49	28–42	26–43	80–85
Hemicelulosa	23–31	20–40	23–38	15–26	n.d.
Lignina	22–34	16–30	12–21	20–32	n.d.
Extraíbles	1–5	2–8	1–2	0.2–5	n.d.
Minerales y otros compuestos inorgánicos	0,1–7	0,1–11	3–20	1–10	0,8–2

n.d. = sin datos disponibles.

Figura 5. Componentes químicos de las fuentes de pasta y papel (%) (Teschke y Demer, 2017).

Tunicados. Los tunicados son los únicos animales conocidos que producen microfibrillas de celulosa. Los tunicados son una familia de animales marinos que tienen una cubierta consistente de microfibrillas de celulosa embebidas en una matriz de proteína. El principal género utilizado para obtención de celulosa es la conocida como *Sea squirts (Ascidacea)* habiendo más de 2300 especies de *Ascidacea*.

Algas. Varias especies de algas (verdes, grises, rojas, amarillo-verde, etc) producen microfibrillas de celulosa dentro de la pared celular. Existen considerables diferencias en la estructura de la microfibrillas de celulosa entre las varias especies de algas debido a los diferentes procesos de biosíntesis (Goffin *et al.*, 2012).

Bacterias. La especie más estudiada de las bacterias es *Acetobacter xylinum*. Bajo condiciones especiales de cultivo, la bacteria secreta microfibrillas de celulosa produciendo una capa de gel compuesta de microfibrillas de celulosa y 97% de agua (Iguchi *et al.*, 2000).

Plantas. Las plantas son la fuente primordial de celulosa, porque ellas son abundantes y también existe una infraestructura preexistente en las industrias textiles para pulpear (tratar y aislar las partículas de celulosa del tamaño de micras) y procesar el producto. En general, las plantas pueden ser purificadas

similarmente a la madera. Una amplia variedad de plantas han sido estudiadas para la obtención de celulosa incluyendo: algodón (Hsieh, 2013; Yue *et al.*, 2012), ramie (Hindeleh y Johnson, 1972), lino (Cao *et al.*, 2008), paja de trigo (Sun *et al.*, 2005), tubérculos de papa (Lu *et al.*, 2013), raíz de banano (Bolio *et al.*, 2011), y las plantas de agave constituyen una de las fuentes disponibles y atractivas para la obtención de celulosa por ser una planta altamente fibrosa (Gumeta, 2009).

2.3. Agave

La familia Agavaceae es endémica de América, se localizan desde el sur de Estados Unidos de América a Colombia y Venezuela, y está conformada por nueve géneros y 340 especies. El centro de mayor riqueza y diversidad biológica se encuentra en México, donde se ubican 261 especies (75% del total) con 177 endémicas (70%), El género más grande y diverso es *Agave* spp., con 159 especies, de las cuales 119 son endémicas de México, representando 74% (Reynoso *et al.*, 2012).

Los agaves son plantas xerófitas y perennes, con hojas dispuestas en espiral y arregladas en rosetas en el ápice de un tallo y las raíces; el tallo es el principal órgano de almacenamiento de agua y carbohidratos de reserva. Las hojas por lo general son suculentas, fibrosas y carnosas, los márgenes exhiben una gran diversidad morfológica y por lo regular tienen una espina al final del ápice (Espinoza, 2015).

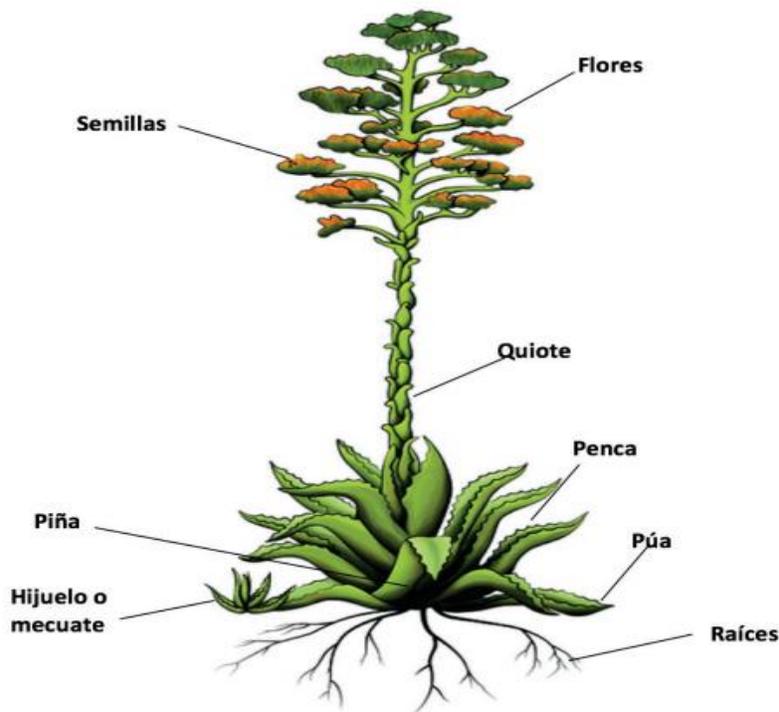


Figura 6. Estructura morfológica del agave (Narváez *et al.*, 2016).

Los 24 estados productores de agave de importancia económica en México son: Baja California Sur, Chiapas, Coahuila, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Zacatecas, Durango, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas, Tlaxcala Veracruz y Zacatecas (Sagarpa, 2016).

El agave tiene diferentes aplicaciones en toda la nación, dentro de estas podemos encontrar las siguientes: alimentación: azúcar, guisos, dulce, envolver barbacoa, mixiotes, gusanos blancos, gusanos rojos, pan de pulque, tortillas, entre otros. Bebidas: aguamiel, miel, atole de aguamiel, pulque, mezcal, tequila, sotol, bacanora, vinagre, jarabe y cerca viva. Agrícola: evitar erosión como formadora de suelo, abono orgánico y planta líder de ecosistemas. Forrajes: para bovinos, ovinos y porcinos. Construcción: cercas, casas, corrales, tejas para cubrir techos de casas, canales para coleccionar el agua de lluvia y resinas termoplásticas. Fibras: cordelería, jarcería, cestería, escobetillas, estropajos tejido y vestuario. Medicina:

curar golpes o lesiones internas, prevención de escorbuto, antiinflamatorio, cura anemias, entre otros. Ornamental: adornos corporales, adornos navideños, arcos florales, adornos en jardines, calles y camellones. Domestico: jabón o detergente para trastes y ropa, shampoo, macetas o recipientes para agua, tapaderas de cazuelas, ollas o barriles, palillos para la extracción de gusanos comestibles, agujas e hilo. Otros usos: industria química, farmacéutica, medicamentos, productos esteroides, productos de celulosa para papel, producción de etanol, celulosa, glucósidos, entre otros. (García *et al.*, 2010). Siendo la elaboración de bebidas alcohólicas la más destacada a nivel nacional e internacional.

2.3.1. Bebidas alcohólicas

Los principales agaves empleados para la elaboración de bebidas alcohólicas son: *Agave angustifolia*, *A. durangensis*, *A. salmiana* subsp. *crassispina*, *A. rhodacantha*, *A. maximiliana*, *A. tequilana*, *A. inaequidens*, *A. potatorum*, *A. cupreata*, *A. marmorata*, *A. americana* var. *oaxacensis*, *A. karwinskii*, *A. hookeri*, *A. kerchovei*, *A. seemanniana*, *A. scabra* subsp. *potosiensis*, *A. angustifolia* var. *rubescens*, *A. cernua* *berger*, *A. convallis* *trel*, *A. guadalajarana* *trel*, *A. rhodocantha*, *A. schidigera* *lem*, *A. shrevei* *gentry* y *A. wocomahi* *gentry* (CONABIO, 2015; Nieto *et al.*, 2016). Entre las principales bebidas alcohólicas típicas que ofrece México, se encuentra el tequila, mezcal y pulque.

El tequila es una bebida alcohólica regional, obtenida por destilación de mosto de *A. tequiliana* Weber variedad azul. El mosto puede ser enriquecido con otros azúcares en una proporción no mayor de 49% de azúcares reductores totales. La piña es la materia prima para la elaboración de tequila. Cada piña tiene un peso de entre 30 y 70 kg. La concentración de azúcares se encuentra entre el 16% y el 28%, a diferencia de la de las hojas que está entre el 3.3% y el 16.1% en peso fresco, dependiendo de la edad de la planta y el tamaño de la hoja (Castro y Guerrero, 2013).

El 13 de abril de 1978 se otorgó el certificado de origen del tequila, en el Registro Internacional des appellations D' origen de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual en Génova, Suiza. La Denominación de Origen "Tequila" (DOT) comprende 181 municipios de cinco estados de la República Mexicana los cuales son: Jalisco con sus 125 municipios, Nayarit con 8, Guanajuato con 7, Tamaulipas con 11 y Michoacán con 30 (Castro y Guerrero, 2013).

La producción de tequila ha contribuido al desarrollo agrícola e industrial de México, especialmente en el estado de Jalisco. De 2013 a 2018 la industrialización de cabezas de agave aumentó de 756,900 toneladas a 1,138,800 toneladas (CRT, 2018). De una hectárea de agave, en promedio se obtienen 100 toneladas de piña. Para elaborar 1 litro de tequila, puro de agave, se requieren aproximadamente 7 kg, a lo que por una hectárea se podrán destilar 14,285.71 litros de tequila (Chavez, 2010).



Figura 7. Proceso de jimado y cosecha del agave tequilero. A) Superficie cultivada con *Agave tequilana B) Planta de *A. tequilana* seleccionada para la jima** C) Productor extrayendo *A. tequilana* y retirando las pencas de la piña*** D) Piña (bola) una vez terminado el proceso de jimado******

(*Correa, 2015; **<https://www.herbalfire.com/blue-agave-agave-tequilana.html>; *** García, 2015; ****Trigo, 2018).

Por su parte, el mezcal es una bebida alcohólica, de origen mexicano, producido de la fermentación de los azúcares extraídos de la piña cocinada de diferentes agaves como *A. angustifolia*, *A. esperima*, *A. potatorum*, entre otros. La planta, para poder ser utilizada en la producción de mezcal, necesita una madurez fisiológica de entre 7 y 12 años. Su elaboración es artesanal y es similar al del tequila, con la diferencia de que no es tecnificado y se pueden utilizar varias especies de agave para su elaboración (Castro y Guerrero, 2013). En 1934 el gobierno mexicano reconoce la denominación de origen del mezcal, de esta manera se otorgó a nueve estados de la república mexicana los cuales son: Tamaulipas, San Luis Potosí, Zacatecas, Durango, Guanajuato, Michoacán, Guerrero, Puebla y Oaxaca (Consejo Regulador de Mezcal, 2016) y en el 2018 se incorporó el Estado de México. Para la producir 1 litro de mezcal, se requieren 15 kg de agave (Naranjo *et al.*, 2016).

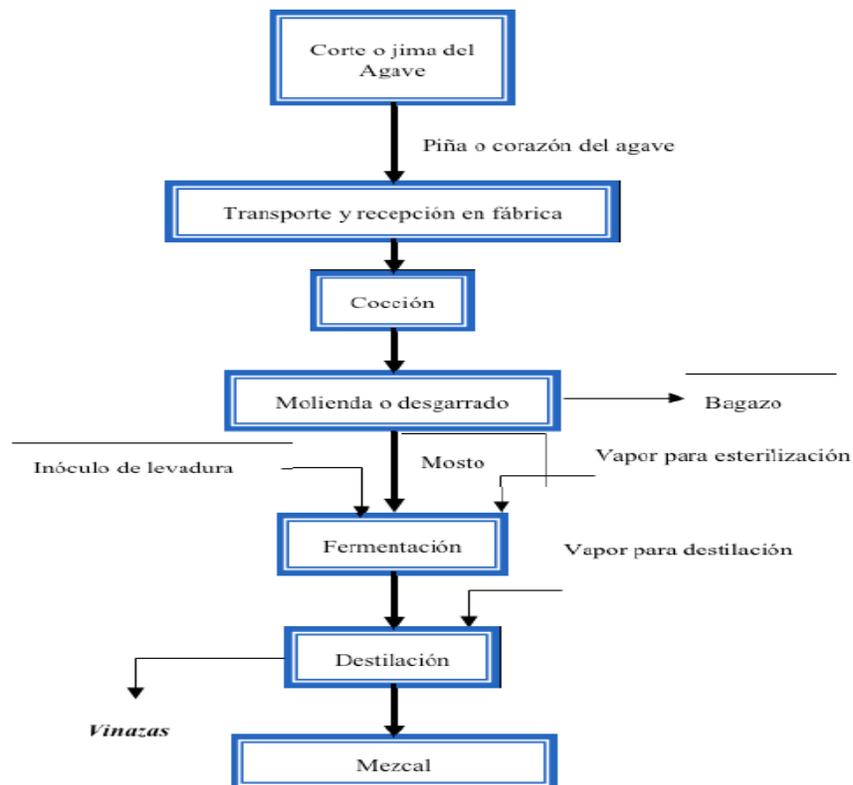


Figura 8. Proceso de elaboración de mezcal (Rodríguez, 2017).

De igual manera, el pulque es una bebida fermentada que se obtiene a partir del aguamiel (Carmen, 2016). El aguamiel es extraído de diferentes especie de agaves como son: *A. americana*, *A. antroviensis*, *A. feroz*, *A. mapisaga*, *A. salmiana* (Cervantes y Pedroza, 2007), Estas variedades de maguey se distribuyen a lo largo de la República Mexicana, donde los estados más destacados son Baja California Sur, Chiapas, Coahuila, Durango, Hidalgo, Jalisco, Nuevo León, Oaxaca, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz (<https://hidroponia.mx/produccion-de-pulque-en-mexico/>, 2016). Los agaves empleados para la elaboración de pulque deben tener una edad de entre 8 a 10 años. En una hectárea de cultivo se reproducen aproximadamente 2,500- 2,800 plantas (Muñiz, 2013). El Servicio de Información Agroalimentación y Pesquera (SIAP) reportó que en el 2018, la producción de pulque fue de 186, 300, 000 L en el país, para esta cantidad de producción se requiere de 9, 315, 000 kg de agave.

Para iniciar la elaboración del pulque, se realiza un capado, que consiste en cortar todas las pencas tiernas centrales. De dos a tres meses después se realiza la picazón, que consiste en formar un cajete en la base de la piña, y finalmente en las dos semanas subsecuentes el cajete se raspa nuevamente, hasta formar un cuenco más profundo para que se acumule por exudación la savia del agave. El volumen de aguamiel en el cajete aumenta paulatinamente con respecto al tiempo, se puede recoger inicialmente 0.4 litros por planta por día y aumenta a 4 ó 6 litros por planta por día los primeros dos meses y luego disminuye hasta 0.4 litros por día hacia el final de la producción, la cual puede durar de 4 a 6 meses. Cada agave tiene una producción de total de 500 a 1000 litros (Ortiz *et al.*, 2008). El consumo del pulque tiene que ser rápido debido a que posee una vida de anaquel de 1 a 3 días. (Castro y Guerrero, 2013).

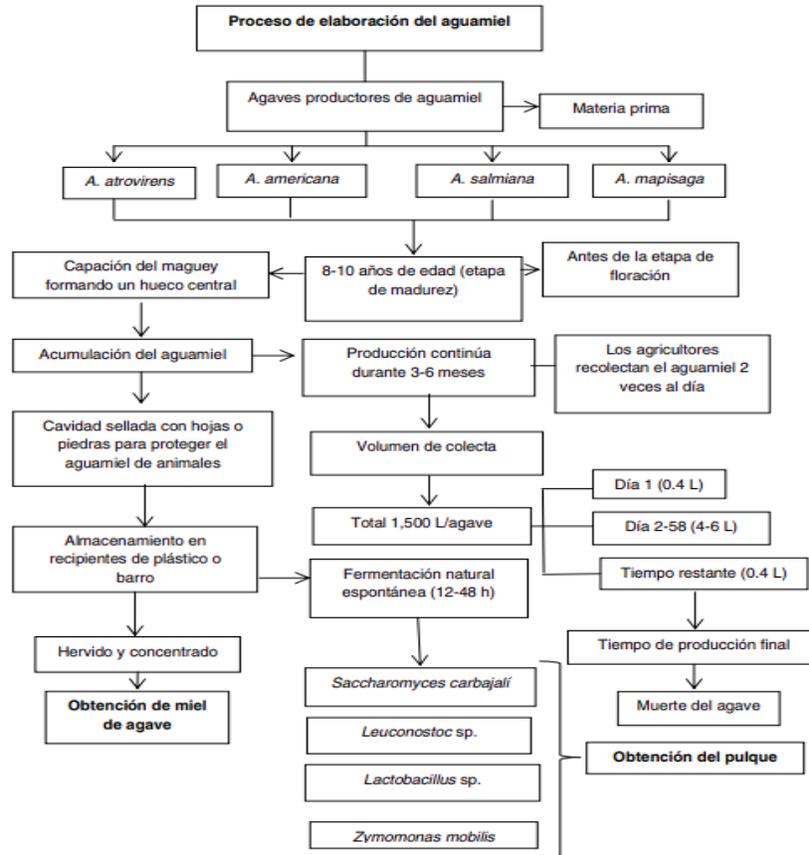


Figura 9. Proceso de elaboración de pulque (Muñiz et al., 2013).

2.3.2. Residuos obtenidos de los procesos de fabricación de tequila, mezcal y pulque.

Al terminar la elaboración del tequila y mezcal, se obtienen variedades de residuos, entre los de mayor impacto se encuentran bagazo, pencas y vinazas.

Se estima que para producir 1 litro de tequila se requiere entre 7 y 8 kg de agave, los cuales se convierten en 5 kg de bagazo/base húmeda (residuo), una vez extraído el jugo y de igual manera para producir 1 litro de mezcal, se requieren 15 kg de agave (Naranjo et al., 2016), los cuales se convierten en 10.71 kg de bagazo. Conforme lo registrado por el Consejo Regulador de Tequila (CRT) y el Consejo Regulador del Mezcal (CRM) en el 2018, la producción fue en total de 309,100,000 L de tequila y 5,100,000 L de mezcal; y debido a esto la demanda de

cultivo de agaves se acrecentó, siendo de 1'138,800,000 ton de *Agave tequilana* var. Azul para producción de tequila y 76,500,000 ton de *Agave spp.* para la producción de mezcal. Basado en estos datos se estimó que la industria tequilera y mezcalera generó aproximadamente 766, 371, 000 ton de bagazo, un residuo generado de la extracción del jugo de la piña de agave.

Así como en el tequila y el mezcal, la producción de pulque también genera residuos sólidos, los cuales no han sido calculados, debido a que su proceso no está estandarizado y en consecuencia el control de las pencas muertas es nulo.

Así como en el bagazo del pulque, las pencas tanto de producción de tequila y mezcal; no se han reportado datos sobre los kilogramos que se generan del jimado.

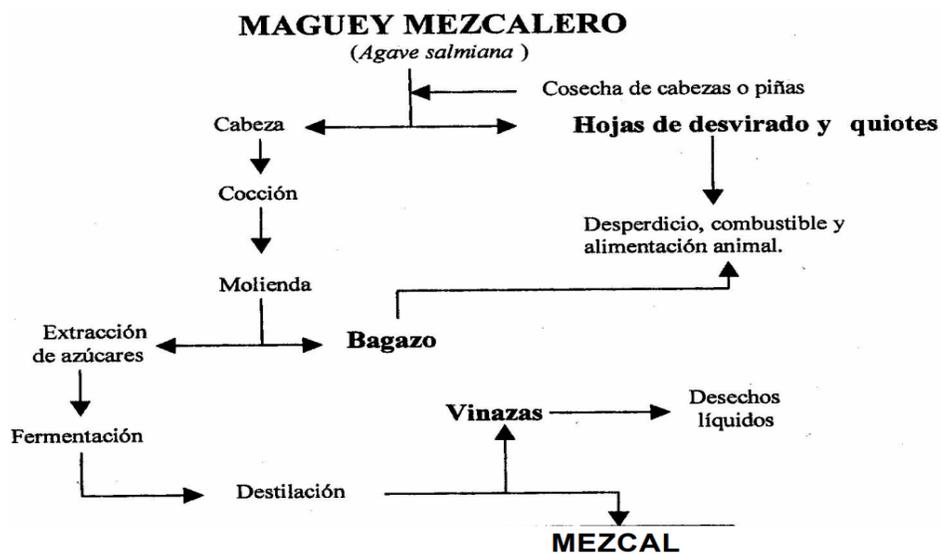


Figura 10. Representación de operaciones unitarias, subproductos y producto final obtenido en la producción de mezcal (Martínez, 2001).

El bagazo es la fibra del agave, obtenida una vez que las piñas han sido cocidas y molidas para generar azúcares que, durante la fermentación, producirán alcoholes y otros compuestos químicos, los cuales serán separados en la destilación (Consejo Regulador del Tequila, 2018), no obstante es un residuo de origen

orgánico y por lo tanto se considera biodegradable, cuando no se realiza un manejo adecuado del mismo puede pasar periodos prolongados (al menos un año) para que de manera natural se descomponga y reintegre sus componentes al medio, en este proceso de descomposición descontrolada su principal problemática es que va a producir lixiviados (líquido residual generalmente tóxico) que contaminan el suelo y el agua cambiando sus propiedades, malos olores que contaminan el aire y proliferación de fauna nociva que pueden convertirse en vectores de problemas a la salud (Ramos, 2017).

Tabla 1. Composición química de las fibras del bagazo en tres especies de agave.

Tipo de agave	Composición	% Celulosa	% Lignina	% Hemicelulosa
<i>Agave tequilana</i>				
Weber*		44.5%	20.1%	25.3%
<i>Agave salmiana</i> **				
		43%	19%	15%
<i>Agave angustifolia</i> ***				
		66%	15.4%	28.32%

Fuente: * Palacio *et al.*, 2019. **Caspeta *et al.*, 2014. *** Rosas, 2016; Martínez y Ortiz, 2015.

Puede verse cambiado los valores (Tabla 1) debido a pre tratamiento que dan las industrias al bagazo (Palacio *et al.*, 2019).

Las pencas cuando son cortadas en el momento del jimado, son dejadas en el área donde se extrae el agave, ocasionando la contaminación del suelo, generación de malos olores que contaminan el aire e incluso la proliferación de fauna nociva (Baena, 2005; Ramos, 2017). Las hojas representan hasta el 66% del peso seco de la biomasa (Nobel, 1986). Las pencas pueden variar en su composición, dependiendo de la especie (Tabla 2).

Tabla 2. Composición química de las fibras de las pencas en tres especies de agave.

Composición Tipo de agave	% Celulosa	% Lignina	% Hemicelulosa
<i>Agave tequilana</i>			
Weber*	45.3%	12.7%	19%
<i>Agave salmiana</i> **			
	48.94%	8.48%	11%
<i>Agave angustifolia</i> ***			
	67.01%	6.25%	25.18%

Fuente: * Corbin *et al.*, 2015; Espino *et al.*, 2014. ** Naranjo *et al.*, 2016; Pérez y López, 2017. ***Teli y Jadhav, 2017.

En los últimos años, las compañías de tequila y mezcal más grandes han adoptado el proceso de compostaje como la única forma de administrar y deshacerse del bagazo de agave (Íñiguez *et al.*, 2011). Con forme a esto, se han realizado investigaciones para mejorar el rendimiento del compostaje (Rodríguez *et al.*, 2013), sin embargo, esto es insuficiente para mantener controlada la cantidad de residuos generados por estas industrias, por lo que se ha buscado otras formas de utilizar el bagazo de agave. Ejemplos de esto es que el bagazo se emplea para estudios con diferentes fines como los siguientes: producción de hongos comestibles (Baena, 2005), combustible renovable de forma directa o en carbón (Chávez, 2010), extracción de compuestos lignocelulósicos (Rosas, 2016), elaborar tableros de fibras (Morales *et al.*, 2016), nanorefuerzos (Pech, 2018), biopolímeros, enzimas (lacasas), producción de bio-hidrógeno (Abreu, 2013), celulosa nanofibrilar (Palacio *et al.*, 2019), entre otros. Con respecto al pulque, los residuos generados por este no son empleados para la elaboración de investigaciones.

Así mismo en las pencas, se ha empleado método de tratamiento para obtener diferentes productos de interés como puede ser: saponinas (Blunden *et al.*, 1980), obtención de azúcares reductores, elaboración de papel (Íñiguez *et al.*, 2001), alimento para animales de corral entre los que se encuentran vacunos, caprinos y

equinos (Baena, 2005), obtención de celulosa (Gumeta, 2009), inulina, gel de pectina (Bouaziz *et al.*, 2014), nanocristales (Rosli *et al.*, 2013), combustible renovable (Corbin *et al.*, 2015), fibra comestible, empaques biodegradables (Naranjo *et al.*, 2016), extracción de compuestos lignocelulósicos (Teli y Jadhav, 2017), Nanoplaquetas (Chávez *et al.*, 2017), películas poliméricas (Silva *et al.*, 2018), entre otros.

Con respecto a lo anterior, los nanomateriales son de los productos que se puede obtener de ambos residuos (bagazo y pencas de agave), así mismo se ha generado en los últimos años mayor interés por los nanomateriales (entre ellos la nanocelulosa) debido a su propiedades (Carchi, 2014).

2.4. Nanocelulosa

La nanocelulosa es la celulosa cuya dimensión es de la escala nanométrica (1-100 nm), una millonésima parte de un milímetro (mm) (Chávez, 2018). La celulosa muestra una estructura jerárquica conformada por cadenas cristalinas que se agregan mediante fuerzas Van der Waals y enlaces de hidrogeno intra- e intermoleculares dando lugar a nanofibrillas en la pared celular de las plantas. Este agrupamiento genera un número pequeño de defectos, por lo que se considera que los cristales de celulosa están unidos por dominios amorfos formando la fibrilla elemental, es así que se ha obtenido en general dos formas o tipos de nanocelulosa dependiendo del método de extracción y de la fuente de la que se parte.

La primera de ellas es la celulosa nanofibrilar (CNF) que consiste en partes cristalinas y amorfas alternadas (Figura 11). Posee un diámetro entre 10 y 40 nm y con longitudes por sobre los 1000 nm, su morfología se suele asemejar al de un tallarín. Se han reportado varios métodos para su extracción, pero los más utilizados son los mecánicos como: criomolienda y homogenización a alta presión.

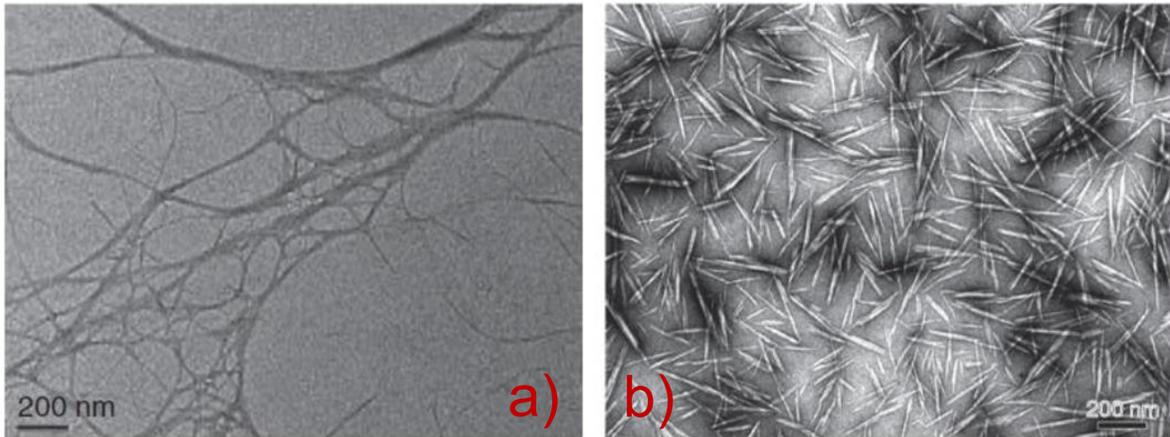


Figura 11. Formas de celulosa mediante microscopio electrónico a) Nanofibrillas y b) Nanocrisales (Borja, 2018).

Es común realizar pretratamientos para remover otros constituyentes mediante enzimas, oxidantes y sustancias alcalinas disminuyendo el consumo energético.



Figura 12. Representación esquemática de las nanofibrillas y nanocrisales de celulosa. a) Estructura hipotética donde se muestra la microfibrila constituida por regiones cristalinas y amorfas, b) nanocrisales de celulosa resultantes tras disolver las regiones amorfas mediante hidrólisis ácida (Moon et al., 2011).

El otro tipo es el de Whiskers de celulosa o celulosa nanocrisalina (CNC) que es básicamente una nanopartícula cristalina con forma de una barra alargada, asemejándose a un grano de arroz. Se puede extraer mediante hidrólisis ácida controlada de plantas o animales (ciertas bacterias y tunicados). Se ha reportado diámetros entre 2 y 20 nm y longitudes entre 100 y 600 nm, inclusive un poco superior a los 1000 nm. El tamaño depende del origen de la celulosa, así como de

la temperatura, tiempo, concentración y naturaleza del ácido empleado para la hidrólisis (Carchi, 2014)

Tabla 3. Tipos de nanocelulosa, sinónimos y rangos característicos de dimensiones nanocelulosa, para cada tipo*.

Tipos de nanocelulosa	Sinónimos en la nomenclatura	Tamaño medio
CNF (nanofibras de celulosa)	Celulosa microfibrilada, nanofibras y microfibras, celulosa nanofibrilada	Diámetro: 5-60 nm Longitud: micrómetros
CNC (nanocristales de celulosa)	Celulosa nanocristalina, cristales de nanocelulosa	Diámetro: 5-70 nm
BNC (nanocelulosa bacteriana)	Celulosa bacteriana, celulosa microbiana, biocelulosa	Diámetro: 20-100nm

Fuente:*Klemm *et al.*, 2011.

2.4.1. Propiedades de la nanofibrillas y nanocristales de celulosa

Las suspensiones de CNF a bajas concentraciones tienen el aspecto de geles cuya transparencia varía en función del grado de separación de las fibras, teniendo la capacidad de formar películas que pueden mostrar interesantes propiedades mecánicas, por ejemplo, un elevado módulo de Young (15-150 GPa) además de que su superficie puede ser modificada químicamente, y también puede añadir viscosidad al agua, dispersar partículas diminutas, resistencia de 8 veces mayor a la del acero, livianas siendo 5 veces menor a la del acero, una expresión y contracción térmica tan baja como el cristal de cuarzo, transparencia, barreras contra el oxígeno y otros gases, y control de la porosidad (<https://www.nippon.com/es/behind/I00151/?pnum=2>, 2016; Carchi, 2014).

Las partículas en las fibras CNC son mucho más cortas que en las CNF, pudiendo presentar también interesantes propiedades, por ejemplo, valores de módulo de Young también elevados (50-143 GPa), además de alta cristalinidad (54-88 %) (Carpenter *et al.*, 2015), relativa baja densidad de $1.6 \frac{g}{cm^3}$, Su resistencia a la

tracción es de aproximadamente 500 MPa, se estimó que el área superficial específica se encuentra en un rango de 150 a 170 $\frac{m^2}{g}$ y el inicio de la degradación térmica se ha detectado entre 200-300°C, dependiendo de la tasa de calentamiento, tipo de partícula y tipo de modificación superficial (Pech, 2018).

Considerando de esta manera su superficie reactiva de grupos laterales –OH que facilitan el injerto de otras especies para obtener diferentes funcionalidad superficiales; siendo estas, el permitir el auto-ensamblaje, controlar la dispersión dentro de las matrices poliméricas y la resistencia de adhesión partícula- partícula y matriz-partícula. Se puede modificar químicamente su superficie y a ciertas concentraciones sus suspensiones se comportan como un cristal líquido. Este comportamiento puede esperarse de cualquier partícula asimétrica que presente forma de barra o lámina (González, 2017).

Las partículas de celulosa manométrica obtenidas por hidrólisis con ácido sulfúrico se encuentran orientadas al azar cuando están diluidas, pero a medida que incrementa su concentración crítica. Este auto organización se observa mediante microscopía de luz polarizada en la que se revela patrones similares a huellas dactilares indicativas de un orden quiral nemático. Además esta estructura puede mantenerse después de evaporación completa del agua produciendo filmes iridiscentes (Carchi, 2014).

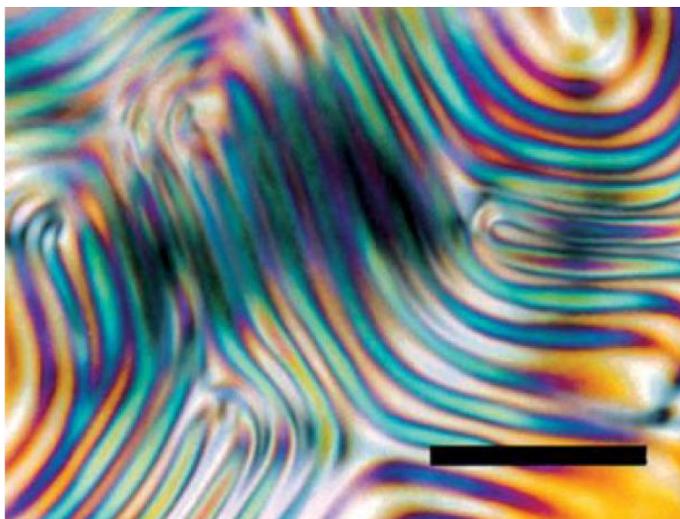


Figura 13. Textura de los cristales líquidos de nanocristales de celulosa visto en un microscopio de luz polarizada, escala, 200 nm (Castro y Delgado, 2016).

Durante el aislamiento de los nanomateriales, la cristalinidad es afectada por los diferentes tratamientos químicos y mecánicos. La celulosa parcialmente mercerizada consiste de más de un polimorfismo (tipo I y tipo II). Se ha encontrado que la celulosa tipo I al someterse a procesos de aislamiento para obtener nanocelulosa adquiere el polimorfismo de celulosa tipo II. Mientras que cuando se elaboran CNC a partir de celulosa tipo II la estructura se conserva. Los CNC de celulosa tipo II poseen una mejor estabilidad térmica y mejores propiedades reológicas que su contraparte de tipo I. Es importante destacar que varios factores determinan el valor de cristalinidad final de la nanocelulosa como: el origen de la celulosa, las condiciones de los procesos de aislamiento y pretratamientos (Pech, 2018).

2.4.2. Aplicaciones de la nanocelulosa

Es un compuesto con gran potencial, que está siendo usado ya en artículos tan variados de diferentes áreas, así como puede ser empleada en otros artículos, como puede ser las siguientes:

Productos de uso personal. El uso de nanocelulosa en pañales para adulto se emplea ya desde varios años en Japón, materia prima para la realización de

cosméticos de uso para el cabello, pestañas, cejas y uñas (<https://www.nippon.com/es/behind/I00151/?pnum=2>, 2016); tapones higiénicos, toallas femeninas (<https://es.gizmodo.com/conoce-los-increibles-usos-para-la-nanocelulosa-471784673>, 2013), entre otros.

Productos de uso cotidiano. La nanocelulosa pueden emplearse para la elaboración de espesantes para plumas, elaboración de papel (<https://www.nippon.com/es/behind/I00151/?pnum=2>, 2016), producción de papel, decoración (Carchi, 2014), tintas para imprimir (Castro y Delgado, 2016), entre otros.

Medicina. La aplicación de nanocelulosa en la ingeniería de tejidos de patologías de carácter cardiovascular, oftálmico, ortopédico, en implantes permanentes, remplazo del tejido óseo, el desarrollo de injertos vasculares, en el uso de la cicatrización de heridas, para la liberación controlada de fármacos, desarrollo de plataformas para inmunoensayos (González, 2017), hemodiálisis, remedios provisionales angioplastias coronarias, elaboración de gasas y otros materiales absorbentes (Chávez, 2018); implantes dentales, tratamiento de quemaduras, úlceras y abrasiones de la epidermis,

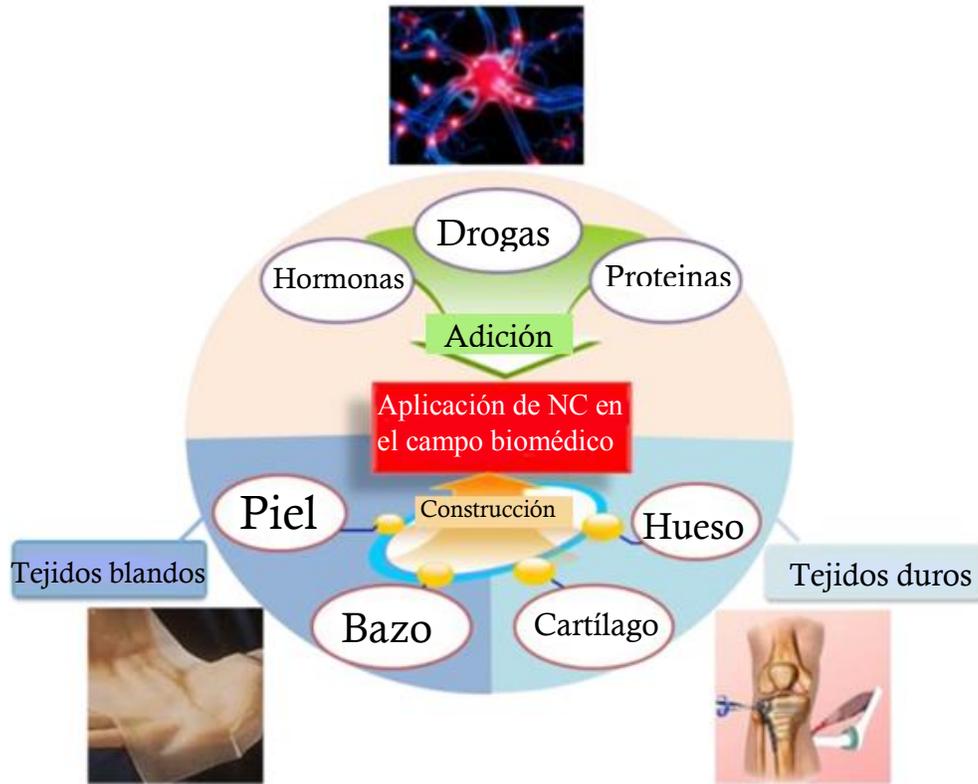


Figura 14. Algunas aplicaciones biomédicas de la nanocelulosa (NC) (Borja, 2018).

CNC con nanopartículas de plata y cera de abeja para obtener propiedades antibacterianas, para proteger las heridas de microorganismos tanto Gram-positivo como Gram-negativo, fabricación de sensores de glucosa, elaboración de soportes para cultivo de células de mamíferos, inmovilización de enzimas y otras biomoléculas; sustrato para el cultivo de tejidos (Carreño *et al.*, 2012), entre otros.

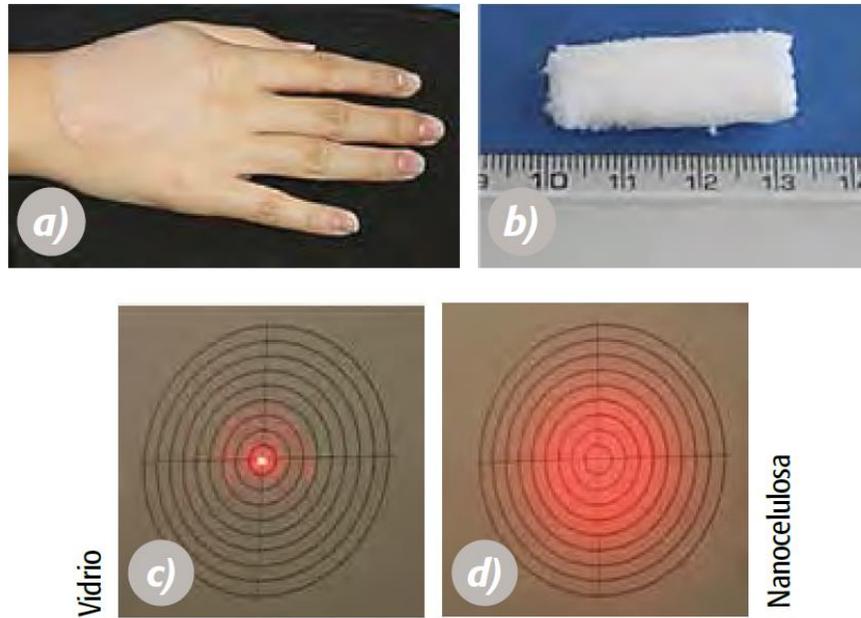


Figura 15. Aplicación de la nanocelulosa en medicina y en materiales, a) aplicación de medicamentos de lenta liberación, b) aplicaciones subcutáneas, c) refracción de la luz a través de un vidrio común y d) refracción de la luz a través de la nanocelulosa (Chávez, 2018).

Industria alimenticia. El uso de nanocelulosa como aditivos en alimentos para reforzar la sensación de cuerpo o masticabilidad de los alimentos, elaboración de diferentes envolturas de alimentos, que tienen un fuerte efecto de barrera frente a la penetración de oxígeno y otros gases (<https://www.nippon.com/es/behind/I00151/?pnum=2>, 2016); elaborar nata de coco, producción de etanol y vino con levaduras inmovilizadas, reactores catalíticos, elaboración de membranas para la separación de polioles, la clasificación de jugos de frutas y pervaporación de componentes aromáticos de frutas (Carreño *et al.*, 2012); sustituto bajo en calorías saborizantes (<https://www.hisour.com/es/nanocellulose-39643/>, 2018), entre otros.

Transportes. Las nanocelulosa pueden ser empleadas para la elaboración de cofres y otras partes de carrocerías de automóviles, así como para realizar fuselajes de aviones, vidrios para cualquier tipo de transporte (<https://www.nippon.com/es/behind/I00151/?pnum=2>, 2016), filtro para automóviles (Carchi, 2014), baterías para automóviles (Pech, 2018), celdas de combustibles (Carreño *et al.*, 2012), entre otros.

Dispositivos electrónicos. Elaboración de pantallas flexibles de fácil transportación, expandibles-contráctiles, componentes para Smartphones (<https://www.nippon.com/es/behind/100151/?pnum=2>, 2016), tinta para impresoras 3D (Castro y Delgado, 2016), baterías para todo tipo de dispositivo, plantilla para componentes electrónicos (Pech, 2018), transductores acústicos (Carreño *et al*, 2012), entre otros.

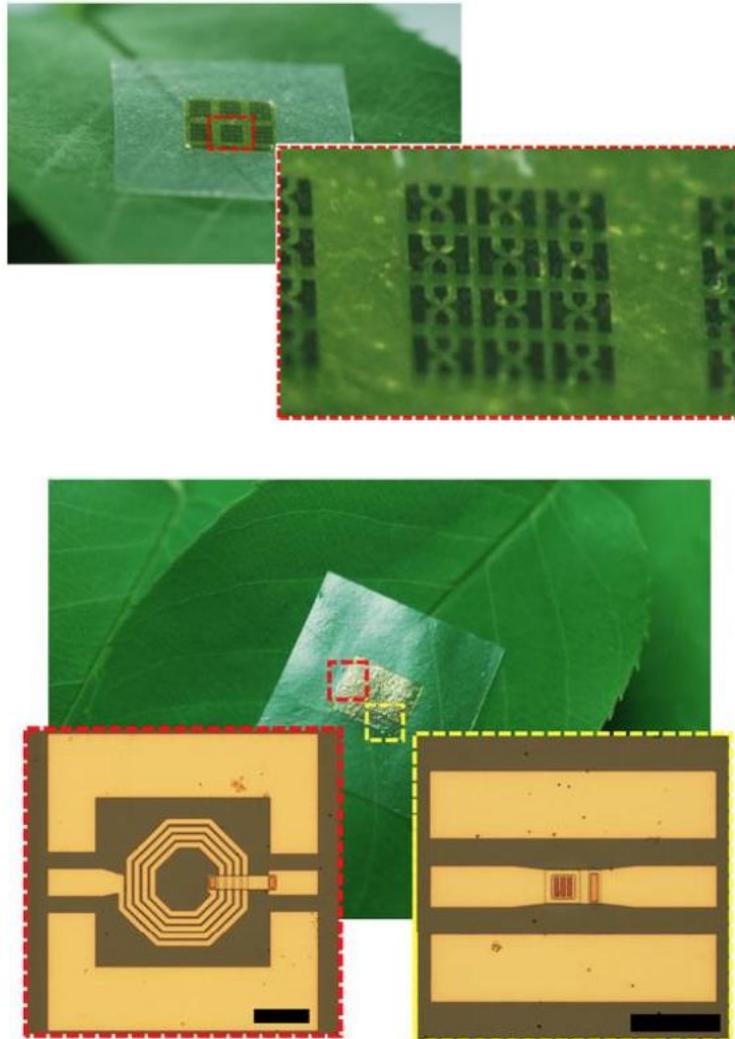


Figura 16. Aplicación de nanocelulosa en chips (Borja, 2018).

Industria textil. Fabricación de fibras y textiles (Pech, 2018).

Industria eléctrica. Elaboración de transformadores eléctricos, capacitores (Castro y Delgado, 2016), elaboración de células fotoeléctricas, películas con circuitos

impresos (Chávez, 2018), baterías (Pech, 2018), membranas con alta conductividad eléctrica (Carreño *et al.*, 2012), entre otros.

Militar. Dispositivos antifalsificables (Castro y Delgado, 2016), armaduras personales ligeras y resistentes (<https://es.gizmodo.com/conoce-los-increibles-usos-para-la-nanocelulosa-471784673>, 2013) entre otros.

Otros. La elaboración de filtros que recogen polvo y otras pequeñas partículas, o sustancias desodorantes que absorben partículas microscópicas portadoras de olor (<https://www.nippon.com/es/behind/I00151/?pnum=2>, 2016), refuerzo de matrices poliméricas como puede ser ácido poliláctico, poliuretano, alcohol polivinílico, alginato, entre otros.; su uso como plantilla en la síntesis de otros materiales como, por ejemplo, varios tipos de óxidos metálicos; como punto de nucleación de nanopartículas magnéticas, de oro, o plata; como soporte de nanopartículas de ZnO, de CNT, de Fe_3O_4 , entre otros; desarrollo de una gran variedad de composites, por ejemplo, bionanocomposites de CNF y bentonite con propiedades mecánicas mejoradas (González., 2017); sustratos transparentes (Chávez, 2018), elaboración de pinturas, material de revestimiento, papel de seguridad (Carchi, 2014), polímeros electroactivos (Pech, 2018), membranas para elaborar pervaporación de mezclas etanol-agua, producción de derivados de acetato de celulosa (Carreño *et al.*, 2012), fabricación de cartón, recuperación de petróleo, inhibidores de corrosión, filtros de tabacos, elaboración de cemento, revestimientos (<https://www.hisour.com/es/nanocellulose-39643/>, 2018), entre otros.

Aunque la nanocelulosa de madera fue producida por primera vez en 1983 por Herrick y Turbak, su producción comercial se pospuso hasta 2010, principalmente debido al alto consumo de energía de producción y al alto costo de producción. Inventia Co. en Suecia fue la primera compañía de nanocelulosa establecida en 2010. Otras compañías activas de primera generación son CelluForce (Canadá), Nippon (Japón), Nano Novin Polymer Co. (Corrí), Universidad de Maine (EE. UU), VTT (Finlandia), Melodea (Israel), entre otras (<https://www.hisour.com/es/nanocellulose-39643/>, 2018).

Según el último estudio de Transparency Market Research (TMR) en el 2015, el mercado mundial de Nanocelulosa se expandirá a una tasa compuesta anual del 33,80% entre 2015 y 2023. Como resultado, la valoración del mercado será de US\$699,6 millones en el 2023, pasando los US\$54.9 millones de 2014 (Chaverra, 2016).

2.4.3. Método de extracción de nanocelulosa

La producción de nanocelulosa se puede lograr mediante tratamientos mecánicos, procesos químicos o por técnicas enzimáticas; o incluso combinaciones de lo anterior con diferentes compuestos de por medio. En la obtención de nanocelulosa se ve comprometida la calidad de esta, debido a que cada compuesto usado modifica sus propiedades finales, y no solo eso, el impacto ecológico que el proceso de extracción tiene al medio ambiente cambia con respecto al usado; esta situación ha despertado interés de buscar procesos que permiten conservar en general las propiedades de interés de la nanocelulosa y al mismo tiempo usar un método que permita ser amigables con el medio ambiente.

3. Materiales y métodos

Con respecto a esto se considera la metodología elaborada por Robles *et al.* (2018) y Hongjia *et al.*, (2012):

3.1. Preparación de muestras

El primer paso a realizar es la recolección de las muestras las cuales serán: hojas de agave recién jimadas, piña cruda y bagazo obtenido después del proceso de cocción realizado en la industria tequilera y mezcalera; y una vez terminado el proceso de elaboración de pulque. Las muestras se toman de *Agave tequilana weber*, *A. salmiana* y *A. angustifolia*; y se envuelven en una película

conservadora, se mantienen a una temperatura de 4°C para evitar la degradación de estas hasta su uso.

Posteriormente las muestras de agave se dejan a temperatura ambiente. Las hojas se cortan frescas maduras de la planta y luego se decortará para raspar la epidermis y el material conciso de la fibra de la línea se enjuaga y se seca. El bagazo se enjuaga y se seca. Para realizar la extracción de los jugos en la piña cruda, se coloca las muestras en una tubería metálica de 24.13 cm de largo por 8.54 de diámetro, y se ejerce presión con un cilindro de metal ajustado dentro de la tubería con una prensa hidráulica, se retiran los líquidos. Los sólidos de bagazo de agave se secan a 60°C en un horno durante 18-24 h para reducir la humedad de la muestra a aproximadamente a 5%.

3.2. Aislamiento de celulosa

Se realiza un tratamiento de etanol-agua (70:30 v / v) de Organosolv (OT) para extraer la lignina de las fibras; el método seguido de acuerdo con la composición química de la materia prima: la temperatura se fija a 200 °C y la presión se estabiliza a ~ 30 bar; la agitación se ajusta a 150 rpm y la reacción se realiza durante 90 minutos. La fracción líquida se separa por filtración y la fracción sólida se lava varias veces hasta que se elimine el licor negro restante.

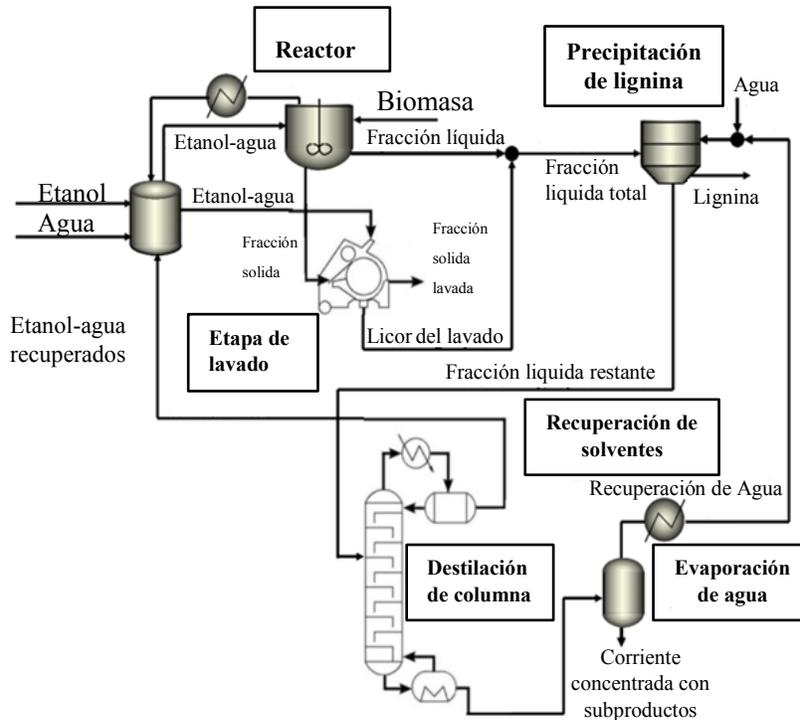


Figura 17. Esquema de proceso de biorefinería de Organosolv-etanol (González *et al.*, 2010).

3.3. Blanqueo total sin cloro

Se realiza un tipo industrial de proceso de blanqueo sin cloro total en las fibras pretratadas. La secuencia de TCF se realiza de la siguiente manera (Figura 17): (1) Etapa de oxígeno alcalino (O_2) realizada dos veces, con agua a un pH 11 estabilizado con $NaOH$ y 0.2% en peso de $MgSO_4$ para neutralizar los metales restantes, esto se realiza con una atmosfera de oxígeno a 6 bar a 98 °C durante 60 minutos. (2) Etapa de peróxido con una reacción de quelación secundaria (PQ) usando H_2O_2 a 3 M, a pH 11 con 1: 5 (p / v) de ácido pentético (DTPA) como quelante, la reacción se realiza durante 120 minutos a 105 °C y (3) Etapa de peróxido alcalino (PO) usando una solución 3 M de H_2O_2 a pH 11 y 0.2% en peso de $MgSO_4$ a 98 °C durante 150 min bajo una atmósfera de oxígeno de 6 bar. La pasta blanqueada se lava varias veces hasta pH neutro después de cada etapa y luego se seca en horno a 50 °C durante 24 h. La fabricación de pasta y el

blanqueo se llevará a cabo en un reactor de lotes de acero inoxidable de 4 L con agitación, presión y temperatura controladas electrónicamente.

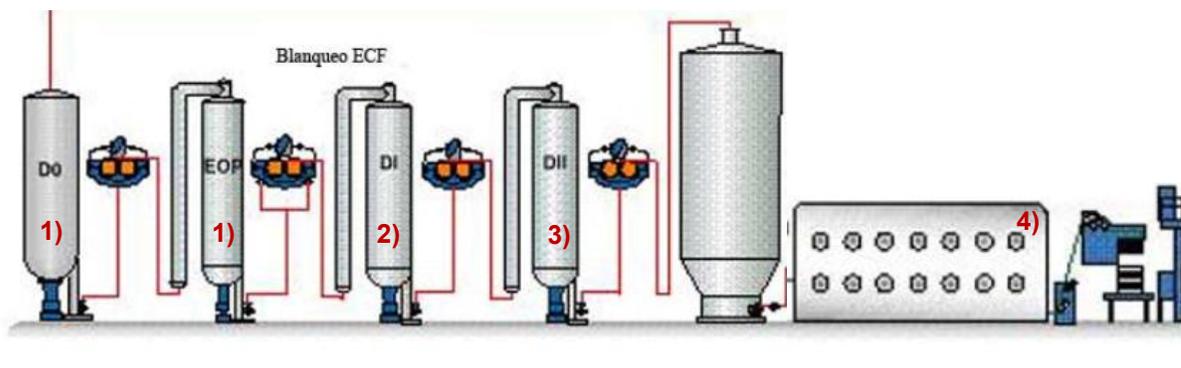


Figura 18. Esquema de proceso moderno de blanqueamiento ECF. 1) Etapa de oxígeno alcalino, 2) Etapa de peróxido con una reacción de quelación secundaria, 3) Etapa de peróxido alcalino y 4) secado (http://chm.pops.int/Portals/0/Repository/batbep_guidelines/UNEP-POPS-BATBEP-GUIDE-08-SP-4.Spanish.PDF, 2006).

3.4. Producción de nanocelulosa

Preparación de la celulosa

Antes de elaborar nanofibras de celulosa o nanocristales de celulosa, las fibras de celulosa blanqueadas se muelen con un molino Retsch utilizando un tamiz de 1 mm y luego se mantienen dentro de una cámara de acondicionamiento sin humedad a 25 °C.

3.5. Hidrólisis ácida mejorada con sonicación

La hidrólisis ácida se realiza en celulosa utilizando una solución de H_2SO_4 a 10.2 M (1:15 p / v) a 45 °C durante 60 min en el interior de un baño de sonicación Elmaonic Elma S 70 H como se presenta en la Figura 17. En este proceso, se inducen cavitaciones a 37 kHz, el uso de cavitaciones durante la hidrólisis como un proceso incorporado en lugar de ser un proceso de dos pasos es un enfoque reciente que ha demostrado producir CNC más homogéneo al tiempo que reduce

los tiempos de producción. La reacción se detiene con agua destilada fría (1: 3 v / v), la fracción no hidrolizada se separa con un embudo Buchner de vidrio sinterizado (grano No.1), después de lo cual el filtrado se concentra y se lava dos veces utilizando un membrana de nailon (0.45 μm) combinada con un embudo de vidrio sinterizado Buchner (grano No. 3) que obtiene una esterilla húmeda que se dispersó en agua destilada hasta un 10% en peso y un pH de 5. CNC se dializa con agua destilada hasta que se estabiliza el pH a neutro. La suspensión CNC se ajusta a una solución al 3% en peso por sonicación directa durante 10 minutos a 20 °C y se mantiene a 5 °C.

3.6. Desfibrilación mecánica

Las nanofibras de celulosa se producen con un homogeneizador de alta presión Niro-Soavi Panda; Las fibras molidas se dispersan primero en una suspensión acuosa (1: 100 g: ml) y luego se pasan varias veces a través de un homogeneizador aumentando la presión hasta que se alcance ~ 1000 bar, momento en el que la suspensión se pasa por un caudal constante durante 90 min. Las suspensiones de CNF se ajustan al 5% en peso y se mantuvieron a 5 °C.

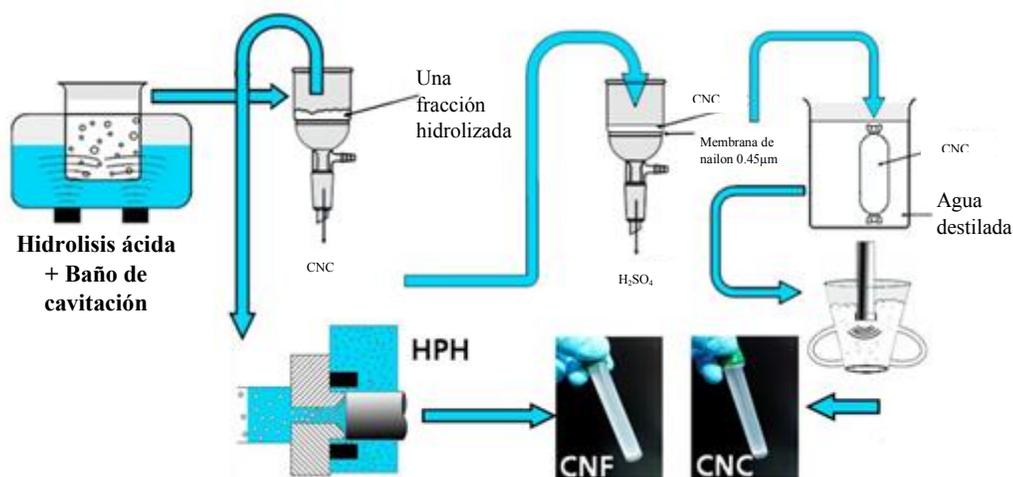


Figura 19. Esquema de flujo visual de los procesos de producción de CNC/CNF. HPH: Homogeneizador de alta presión (Robles *et al.*, 2018).

3.7. Caracterización de las fibras

El análisis químico de las fibras de los agaves se realiza para determinar la cantidad de celulosa disponible para una extracción adicional. Esta caracterización se lleva a cabo de acuerdo con los métodos estándar (TAPPI T204 cm-07, 2007; TAPPI T207 cm-08, 2008; TAPPI T211 om-12, 2012; TAPPI T222 om-11, 2011; Wise, Murphy, y D'Addieco, 1946). Los espectros de infrarrojos se registraran en un espectrómetro PerkinElmer Spectrum Two FT-IR equipado con un accesorio ATR universal con lente de cristal de reflexión interna. El rango definido fue de 600 a 4000 cm^{-1} y la resolución de 8 cm^{-1} . Para cada muestra, se registran 20 exploraciones. Las propiedades de color de los diferentes tratamientos se miden con un colorímetro de la serie X-Rite 500 en 10 regiones diferentes de cada compuesto, se realiza el perfil RGB para la capa de superficie final de cada compuesto. Las imágenes SEM se obtienen con un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6400 con cátodo de emisión de campo, con una resolución lateral de 10-11 Å a 20 kV.

Las nanopartículas de celulosa se miden en seco para controlar el rendimiento de cada tratamiento después de la hidrólisis mediante el uso de la ecuación 1:

$$Y = \frac{M_c \times M_r}{M_s \times M_o}$$

Donde M_c es la masa de nanopartículas de celulosa secas (se liofilizan y luego se mantienen dentro de un desecador); M_r es la masa de la suspensión total, M_s es

la masa de la muestra de la suspensión antes del secado y M_0 es la masa de celulosa antes de la hidrólisis (CNC) o la homogeneización (CNF).

Así se obtienen imágenes de microscopía de fuerza atómica operando en modo tapping con un microscopio de sonda de barrido NanoScope IIIa, Multimode TM-AFM de Digital Instruments-Veeco equipado con un voladizo de punta de silicona integrado con una frecuencia de resonancia de 300 kHz. Para obtener resultados representativos, se escanearan diferentes regiones de las muestras.

El tamaño de partícula y el potencial zeta se mide en el equipo Malvern Zetasizer Nano Z, el índice de refracción para celulosa se considera en 1.47, las mediciones se realizan a 25 °C. Para el análisis de tamaño, se colocan 0.1 g / L de suspensión de celulosa dentro de una cubeta de plástico desechable que realiza 13 exploraciones con un ángulo de incidencia de 173 °C repetido tres veces para cada muestra. Se colocan suspensiones de nanocristales con potencial zeta dentro de la célula zeta capilar plegada Malvern y se mide utilizando el modelo de Smoluchowski ($\kappa \cdot a = 1.50$). Se realiza 10 exploraciones y se miden tres muestras para cada especie de agave.

La difracción de rayos X en polvo se mide para evaluar la cristalinidad de las muestras de nanocelulosa; los patrones se recolecten con un difractómetro multipropósito Panalytical Phillips X'Pert PRO, con muestras montadas en una oblea de silicio de fondo cero fijadas en un portador de muestras genérico, usando radiación $\text{CuK}\alpha$ monocromática ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) en un rango de 2θ de 5 a 50 con paso Tamaño de 0.026 y 80 s por paso a temperatura ambiente. La cristalinidad de celulosa se mide a partir de la difracción de polvo utilizando el método Segal, este método se implementa fácilmente con datos de un difractómetro de polvo y, a pesar de las objeciones, todavía se usa ampliamente ya que constituye una herramienta rápida y fácil para analizar y comparar cualitativamente diferente estructuras de celulosa. Para lograr este índice, se utiliza la difracción I200, que está asociada con el dominio cristalino principal, y el máximo de dispersión de la celulosa amorfa, que tiene su mayor intensidad alrededor de $2\theta = 18^\circ$. El índice de cristalinidad relativa segal está dado por la siguiente ecuación:

$$Cr. I_{.segal} = 100x \frac{I_{200} - I_{AM}}{I_{tot}}$$

Para un índice de cristalinidad más confiable, se utiliza el método de ajuste de pico para determinar la relación del área cristalina ajustada al área de reflexión total, incluida la contribución amorfa con el fondo extraído. Los picos seleccionados corresponden a los índices 1-10, 110, 200 y 004 de Miller correspondientes a la célula unitaria monoclinica Iβ de celulosa. La cristalinidad aparente se estima con la siguiente ecuación:

$$Cr. I_{.ajuste\ de\ pico} = 100x \frac{\int_{2\theta_1}^{2\theta_2} S_{110} d2\theta + \int_{2\theta_1}^{2\theta_2} S_{110} d2\theta + \int_{2\theta_1}^{2\theta_2} S_{200} d2\theta + \int_{2\theta_1}^{2\theta_2} S_{004} d2\theta}{\int_{d2\theta} S_{tot} d2\theta}$$

En el que se supone que la suma de las áreas correspondientes a la difracción de los planos cristalinos es el área de la región cristalina, siendo 2θ1 y 2θ2 los límites de la señal ajustada para los dominios cristalinos correspondientes (S1-10, S110, S200, S004). Mientras que Stot corresponde al área total. Se realizan interacciones de mínimos cuadrados hasta que se alcance el coeficiente de determinación R² ≥ 0.997, que corresponde a un ajuste preciso de 99.7%.

Los tamaños de los dominios de cristalita se estiman con la ecuación de Scherrer utilizando los picos correspondientes a las regiones cristalinas como se indica en la siguiente ecuación:

$$d_{hkl} = \frac{k\lambda}{H_{hkl} \cos\theta}$$

Siendo κ la constante de Scherrer más ajustada a la forma del nanocristal (0.86), λ la longitud de onda (1.5418 Å), Hhkl corresponde a la amplitud o anchura total a la mitad de la intensidad máxima (FWHM) para el pico correspondiente y θ es la mitad del ángulo Bragg en el pico máximo dado en radianes.

La espectrometría de 13C RMN se realiza utilizando un espectrómetro digital de RMN AVANCE-500, a una frecuencia de 250 MHz con un tiempo de adquisición de 0.011 s, a temperatura ambiente. El espectro se registra en 32 exploraciones y

se utiliza agua como disolvente para todas las nanocelulosas. El índice de cristalinidad de RMN se determina separando la región C4 del espectro en picos cristalinos y amorfos, y se calcula dividiendo el área del pico cristalino por el área total asignada al pico C4 como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Cr.I_{NMR} = 100 \times \frac{\int_{87}^{93} S dx}{\int_{80}^{93} S dx}$$

En la que S representa la intensidad en un cambio químico dado F (); x corresponde al cambio químico, la asignación cristalina para la región C4 se considera la región entre 87 a 93 ppm y la región C4 total se establece entre 80 y 93 ppm (Robles *et al.*, 2018).

4. Conclusión

La celulosa es la materia prima natural más común disponible en la tierra con una producción de biosíntesis de 1011 a 1012 toneladas por año. Tiene muchos beneficios que incluyen bajo costo, peso ligero, renovable, biodegradable y respetuoso con el medio ambiente. Se pueden extraer de plantas y animales. La extracción y el aislamiento de nanocelulosa a partir de las fibras de celulosa ha llevado al descubrimiento de estos nuevos materiales renovables, biocompatibles, biodegradables, de tamaño nanométrico de diferentes tipos y formas. Los procesos utilizados en el aislamiento determinan las propiedades finales de estos materiales. La extracción de partículas de nanocelulosa ha llevado al aislamiento de materiales tales como nanocristales de celulosa (CNC) y nanofibrillas de celulosa (CNF). Estos materiales de tamaño nanométrico tienen diferentes formas que también afectan sus propiedades químicas. En los últimos tiempos, se le han encontrado aplicaciones muy útiles en nuestra sociedad.

La celulosa nativa que pretende usarse en este trabajo se obtiene de los subproductos generados durante la producción de tequila, mezcal y pulque con procesos conocidos por su bajo impacto ambiental, pero estos materiales no se utilizan ampliamente debido a la falta de valor agregado que estos representan a nivel industrial. Sin embargo, para elaborar CNF y CNC, el uso de Organosolv y TCF puede producir fibras con alto potencial usando los diferentes tipos de agave; demostrado en el trabajo de investigación de Robles (2018), Las nanopartículas de celulosa obtenidas de tales celulosas produjeron altos rendimientos de producción (particularmente en el caso de CNC), mientras que sus propiedades analizadas estuvieron dentro de los criterios esperados (dimensiones, estabilidad coloidal y cristalinidad). Por lo tanto, los subproductos de *A. tequilana* Weber, *A. salmiana* y *A. angustifolia*; pueden ser considerados como una buena fuente para producir productos de valor agregado como nanocristales de celulosa y nanofibras de celulosa de hojas, piña cruda y bagazo.

Referencias

- Abreu, J. (2013). Aprovechamiento de bagazo de *Agave tequilana* Weber para la producción de bio-hidrógeno (Tesis de maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí.
- Baena, A. (2005). Aprovechamiento de bagazo del maguey verde (*Agave salmiana*) de la Agroindustrial del mezcal en San Luis Potosí para la producción de hongos Ostra (*Pleurotus ostreatus*) (Tesis de maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí.
- Balam, J. (2006). Obtención y caracterización de materiales compuestos de fibras de la piña de henequen y polipropileno. *Revista mexicana de ingeniería química*, 5(1), 39-44.
- Blunden, G., Carabot, A., y Jewers, K. (1980). Steroidal sapogenins from leaves of some species of *Agave* and *Furcraea*. *Phytochemistry*, 19, 2489-2490.
- Bolio, G., Valadez, A., Veleza, L., y Andreeva, A. (2011). Whiskers de celulosa a partir de residuos agroindustriales de banano: obtención y caracterización. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(2), 291-299.
- Borja, B. (2018). Síntesis y caracterización de nanocelulosa de orígenes diversos (Memoria de licenciatura). Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Barcelona.
- Bouaziz, M., Rassaoui, R., y Besbes, S. (2014). Chemical composition, functional properties, and effect of inulin from tunisian *Agave americana* L. leaves on textural qualities of pectin gel. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Chemistry*, 2014, 11.
- Cao, x., Chen, Y., Chang, P., Muir, A., y Falk, G. (2008). Starch-based nanocomposites reinforced with flax cellulose. *Express Polym Lett*, 2(7), 502-520.
- Carchi, D. (2014). Aprovechamiento de los residuos agrícolas provenientes del cultivo del banano para obtener nanocelulosa (Tesis de licenciatura). Universidad de Cuenca, Ecuador.

- Carlsson, D., Lindh, J., Stromme, M., y Mihranyan, A. (2015). Susceptibility of I alfa- and I beta-Dominated cellulose to TEMPO-Mediated Oxidation. *Biomacromolecules*, 16(5), 1643-1649.
- Carmen, M. (2016). ¿Sabes cómo se prepara el pulque? Recuperado de: <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/menu/2016/11/24/sabes-como-se-prepara-el-pulque> el 14 de Julio de 2019.
- Carpenter, A., de Lannoy, C., y Wiesner, M. (2015). Cellulose Nanomaterials in Water Treatment Technologies. *Environmental Science and Technology*, 49(9), 5277-5287.
- Carreño, L., Caicedo, L., y Martínez, C. (2012). Técnicas de fermentación y aplicaciones de la celulosa bacteriana: una revisión. *Ingeniería y Ciencia*, 8(16), 307-335.
- Caspeta, L., Caro, M., Ponce, T., y Martínez, A. (2014). Enzymatic hydrolysis at high-solids loadings for the conversion of agave bagasse to fuel ethanol. *Applied Energy*, 113(2014), 277-286.
- Castro, A., y Guerrero, J. (2013). El agave y sus productos. *Temas selectos de Ingeniería de alimentos*, 2(2013), 53-61.
- Castro, C., y Delgado, F. (2016). La nanocelulosa: propiedades y aplicaciones. *Boletín IIE*, 56-60.
- Cazaurang, P. (1990). Dissolving-Grade pulps from henequen fiber. *Cellulose Chemistry and Technology*, 4, 629-638.
- Cervantes, M., y Pedroza, A. (2007). El pulque: características microbiológicas y contenido alcohólico mediante espectroscopia raman. *Nova*, 5(8), 135-146.
- Chaverra, D. (2016). Nanocelulosa expande su presencia en el mercado. Recuperado de: <https://www.inpralatina.com/201601056121/noticias/empresas/nanocelulosa-expande-su-presencia-en-el-mercado.html> el 14 de Julio de 2019.
- Chávez, L. (2010). Usos de bagazo de la industria mezcalera como materia prima para generar energía. *Ingenierías*, 13(47), 8-16.

- Chávez, L. (2018). Aplicaciones de la nanocelulosa obtenida del maguey. Univerisdad Autonoma de Nuevo Leon, págs. 12-15.
- Chávez, L., Sepúlveda, S., Rodríguez, C., Silva, J., García, N., y Pérez, O. (2017). Isolation and characterization of cellulose nanoplatelets from the parenchyma cell of *Agave salmiana*. *Cellulose*, 24, 3741-3752.
- CONABIO. (2015). Recuperado de: [file:///E:/23%20TRIPTICO%20MAGUEYES%20CONABIO%20\(1\).pdf](file:///E:/23%20TRIPTICO%20MAGUEYES%20CONABIO%20(1).pdf) el 14 de Mayo de 2019.
- Consejo Regulador de Mezcal. (2016). Mezcal. Recuperado de: <http://mezcal.com/es/procesos.php> el 18 de Mayo de 2019.
- Consejo Regulador del Tequila. (2018). Recuperado de: <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/?fbclid=IwAR0fCHJ06I8iYTatvDqcLCfzOI4uEn8udzKrly7GuUgaP4ALFycjmWslPPA> el 14 de Mayo de 2019.
- Corbin, K., Byrt, C., Bauer, S., DeBolt, S., Chambers, Don., Holtum, J., Karem, G., Henderson, M., Lahnstein, J., Beahan, C., Bacic, A., Fincher, G., Bettes, N., y Burton, R. (2015). Prospecting for Energy-Rich Renewable Raw Materials: Agave Leaf Case Study. *PLoS ONE*, 10(8), 1-23.
- Correa, J. (2015). El agave, esencial para el tequila y el bioetanol. Recuperado de: <https://www.themanufacturer.com/articles/el-agave-esencial-para-el-tequila-y-el-bioetanol/> el 5 de Junio de 2019.
- Espino, E., Cakir, M., Domemek, S., Roman, A., Belgacem, N., y Bras J. (2014). Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from industrial by-products of *Agave tequilana* and barley. *Industrial Crops and Products*, 62(2014), 552-559.
- Espinoza, L. (2015). Generalidades e importancia de los agaves en México. *Herbario CICY*, 7, 161-164.
- García, E., Méndez, S., y Talavera, D. (2010). El género *Agave* ssp en México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 5(2010), 109-129.

- García, P. (2015). El sorprendente uso del agave que no es tequila. Recuperado de: <https://www.expoknews.com/el-sorprendente-uso-del-agave-que-no-es-tequila/> el 5 de Junio de 2019.
- Giri, J., y Adhikari, R. (2012). A brief review on extraction of nanocellulose and its application. *BIBECHANA*, 9(2013), 81-87.
- Goffin, A., Habibi, Y., Raquez, J., y Dubois, P. (2012). Polyester-Grafted Cellulose Nanowhiskers: A New Approach for Tuning the Microstructure of Immiscible Polyester Blends. *ACS applied materials & interfaces*, 4(7), 3364-3371.
- González, M., García, A., Chouaibi, F., Hajji, N., y Labidi, J.(2010). Lignocellulosic biorefinery processes energy integration. *Chemical Engineering Transactions*, 21, 553-558.
- González, M. (2017). Desarrollo de materiales biohíbridos funcionales mediante ensamblado de nanofibras de celulosa y sepiolita (Tesis de Doctorado). Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.
- Gumeta, C. (2009). Estudio del secado convectivo y de la extracción de celulosa a través del proceso organosolvente a partir de *Agave atrovirens* Karw (Tesis de Doctorado). Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.
- Gurrola, D. (2016). Aprovechamiento integral del bagazo de agave mescalero cocido para su uso en la agricultura y ganadería (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional, Durango.
- Hindeleh, A., y Johnson, D. (1972). Crystallinity and crystallite size measurement in cellulose fibres: 1. *Ramie and Fortisan*. *Polymer*, 13(9), 423-430.
- Hon, D. (2000). *Wood and cellulosic chemistry*. CRC press.
- Hsieh, Y. (2013). Cellulose nanocrystals and self-assembled nanostructures from cotton, rice straw and grape skin: a source perspective. *Journal of Materials Science*, 48(22), 7837-7846.
- Iguchi, M., Yamanak, S., y Budhiono, A. (2000). Bacterial cellulose—a masterpiece of nature's arts. *Journal of Materials Science*, 35(2), 261-270.

- Íñiguez, G., Díaz, R., Sanjuan, R., Anzaldo, J., y Rowell, R. (2001). Utilization of by-products from the tequila industry. Part 2: potential value of Agave tequilana Weber azul leaves. *Bioresource technology*, 77(2001), 101-108.
- Íñiguez, G., Valadez, A., Manríquez, R., y Moreno, M. (2011). Utilization of by-products from the tequila industry Part 10: characterization of different decomposition stages of Agave tequilana Webber bagasse using FTIR spectroscopy, thermogravimetric analysis and scanning electron microscopy. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(1), 61-74.
- Kamide, D. (2005). Chemistry of cellulose as an organic compound: survey of chemical structure (1830-1930). *Chemie-International Edition*, 5438-5466.
- Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindstrom, T., Ankerfors, M., Gray, D., y Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie-International*, 50(24), 5438-5466.
- Koukios, E., y Valkanas, G. (1982). Process for chemical separation of the three main components of ligocellulosic biomass. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 21(2), 309-314.
- Lu, H., Gui, Y., Zheng, L., y Liu, X. (2013). Morphological, crystalline, thermal and physicochemical properties of cellulose nanocrystals obtained from sweet potato residue. *Food Research International*, 50(1), 121-128.
- Martínez, I. (2001). Uso de residuos de la elaboración de mezcal en la alimentación de borregas (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- Martínez, F. (2010). A empinar el codo... Una hectárea de agave: 14 mil litros de tequila. Recuperado de: <http://www.janambre.com.mx/2010/08/04/a-empinar-el-codo-una-hectarea-de-agave-14-mil-litros-de-tequila/> el 14 de Julio de 2019.
- Martínez, G., y Ortiz, Y. (2015). Properties of Agave angustifolia Haw. bagasse before and after its composting. *Science with quality*, 6(4), 418-429.
- Mohanty, A., Misra, M., y Drzal, L. (2005). *Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites*. New York, United States: Taylor & Francis.

- Moon, R., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., y Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941-3994.
- Morales, M., González, E., y Mesa, L. (2016). Avances en la obtención de tableros de fibras a partir de mezclas de residuales lignocelulosicos de bagazo. Universidad Central Marta Abreu de las villas, Brasil.
- Moscoso, M. (2013). Lo que no sabes de la industria y el consumo de papel. Recuperado de: <https://www.natura-medioambiental.com/lo-que-no-sabes-de-la-industria-y-el-consumo-de-papel/> el 28 de Mayo de 2019.
- Muñiz, D., Rodríguez, R., Rodríguez, R., Contreras, J., Aguilar, C. (2013). Producción Artesanal de aguamiel: Bebida tradicional mexicana. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 5(10), 12-19.
- Naranjo, C., Alamilla, L., Gutiérrez, G., Torres, E., Solorza, J., Romero, S., Yee, H., Morales, F., y Mora, R. (2016). Aislamiento y caracterización de celulosas obtenidas de fibras de Agave salmiana aplicando dos métodos de extracción acido- alcali. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(1), 31-43.
- Narváez, A., Martínez, T., y Jiménez, M. (2016). El cultivo de maguey pulquero: opinión para el desarrollo de comunidades rurales del altiplano mexicano. *Revista de geografía agrícola* (56), 33-44.
- Nieto, R., Vargas, J., Nieto, J., Rodríguez, A., Jiménez, V., Hernández, J., y Ortiz, M. (2016). El cultivo de maguey pulquero (Agave salmiana) en el Valle del Mezquital. Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, Hidalgo.
- Nobel, P. (1986). Environmental responses and productivity of the CAM plant, Agave tequilana. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39(1987), 319-334.
- Ortiz, R., Pourcelly, G., Doco, T., Williams, P., Dornier, M., y Belleville, M. (2008). Analysis of the main components of the aguamiel produced by the maguey-pulquero (Agave mapisaga) throughout the harvest period. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* , 56(10), 3682-3687.

- Palacio, H., Hernández, J., Esquivel, M., Toriz, G., Rojas, O., y Sulbarán, B. (2019). Isolation and characterization of nanofibrillar cellulose from Agave tequilana Weber Bagasse. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 7.
- Pech, S. (2018). Obtención y modificación de nanocristales de celulosa de residuos de Agave tequilana Weber para la producción de nanorefuerzos para Poli (ácido láctico) (Tesis de Doctorado). Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., Mérida.
- Pérez, J., y López, M. (2017). Recent developments in Agave performance as a drought-tolerant biofuel feedstock: agronomics, characterization, and biorefining. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2017, 1-17.
- Ramos, J. (2017). Impacto de los residuos de la industria tequilera. Recuperado de: <https://www.casasauza.com/procesos-tequila-sauza/impacto-residuos-industria-tequilera> el 17 de Mayo de 2019.
- Rebouillat, S., y Pla, F. (2013). State of the Art Manufacturing and Engineering of Nanocellulose: A review of available data and industrial applications. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 4(2), 165-188.
- Reynoso, R., García, A., López, W., López, A., Cadena, P., Pérez, M., y Domínguez, M. (2012). Identificación taxonómica de agave (*Agave* spp.) utilizados para elaborar licor comiteco en Chiapas, México. *Agro productividad*, 9-17.
- Robles, E., Fernández, J., Barbosa, A., Gordobil, O., Carreño, N., y Labidi, J. (2018). Production of cellulose nanoparticles from blue agave waste treated with environmentally friendly processes. *Data in Brief*, 18(2018), 294-302.
- Rodríguez, R., Jiménez, J., Real, J., Salcedo, E., Zamora, J., y Iñiguez, G. (2013). Utilización de subproductos de la industria tequilera Parte 11: Compostaje de bagazo de agave crudo y biosólidos provenientes de una planta de tratamiento de vinazas tequileras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(4), 303-313.
- Rodríguez, A. (2017). El mezcal, su producción y su tratamiento de residuos. *Alianza y tendencias*, 2(8), 10-14.

- Rosas, Y. (2016). Extracción de compuestos lignocelulosicos de bagazo de Agave angustifolia Haw obtenidos por organosolv asistido con microondas (Tesis de Maestria). Instituto Politécnico Nacional, Morelos.
- Rosli, N., Ahmad, I., y Abdullah, I. (2013). Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from Agave angustifolia Fibre. *BioResources*, 8(2), 1893-1908.
- Rowell, R. (2012). Handbook of wood chemistry and wood composites. New York, United States: CRC press.
- Sánchez, A. (2017). Producción de tequila rompe récord histórico. Recuperado de: <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/produccion-de-tequila-rompe-record-historico> el 3 de julio de 2019.
- Silva, J., Cantú, M., Vásquez, S., Toxqui, A., y Chávez, L. (2018). Biopolymeric films obtained from the parenchyma cells of Agave salmiana leaves. *Springer Nature*, 2018, 1-11.
- Sun, X., Xu, F., Sun, R., Fowler, P., y Baird, M. (2005). Characteristics of degraded cellulose obtained from steam-exploded wheat straw. *Carbohydrate Research*, 340(1), 97-106.
- Teli, M., y Jadhav, A. (2017). Mechanical extraction and physical characterization of Agave Angustifolia v. Marginata lignocellulosic fibre. *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 17(1), 6-10.
- Teschke, K., y Demer, P. (2017). Industria de papel y pasta de papel. Madrid: Chantal Dufresne, BA.
- Torres, F., Troncoso, O., Torres, C., y Grande, C. (2013). Cellulose based blends composites and nanocomposites. *Advances in Natural Polymers*, 21-54.
- Trigo, N. (2018). La miel de agave crece cada año en Jalisco. Recuperado de: https://www.ntrguadalajara.com/post.php?id_nota=98050 el 5 de Junio de 2019.
- Yue, Y., Zhou, C., French, A., Xia, G., Han, G., Wang, Q., y Wu, Q. (2012). Comparative properties of cellulose nano-crystals from native and mercerized cotton fibers. *Cellulose*, 19(2012), 1173-1187.

- <https://www.bioenciclopedia.com/roble-comun/>. (7 de junio de 2019).
- http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/. (13 de mayo de 2019).
- <https://hidroponia.mx/produccion-de-pulque-en-mexico/>. (20 de Mayo de 2019).
- <https://www.hisour.com/es/nanocellulose-39643/>. (20 de Mayo de 2019).
- <https://www.nippon.com/es/behind/l00151/?pnum=2>. (10 de Junio de 2019).
- <https://es.gizmodo.com/conoce-los-increibles-usos-para-la-nanocelulosa-471784673>. (10 de Junio de 2019).
- <https://www.herbalfire.com/blue-agave-agave-tequilana.html>. (29 de Junio de 2019).
- http://chm.pops.int/Portals/0/Repository/batbep_guidelines/UNEP-POPS-BATBEP-GUIDE-08-SP-4.Spanish.PDF. (29 de junio de 2019).