

Recibido:
09/07/2024
Aceptado:
12/09/2024
Publicado:
15/09/2024

El Agave en México: Residuos orgánicos como adsorbentes para la remoción de contaminantes en el agua

The Agave in Mexico: Organic waste as adsorbents for the removal of contaminants from water

Rubi Itzel Franco Mota¹, Maria Dolores Josefina Rodríguez-Rosales¹, Alfredo de Jesus Martínez-Roldán^{1,2}, Víctor Jesús Martínez Gómez^{1,2}, Armando De la Peña Arellano¹, María Gorety Contreras Hernández^{1,3*}

¹Tecnológico Nacional de México - ITDurango, Maestría en Sistemas Ambientales. Blvd. Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya C.P. 34080 Durango, Dgo. <https://orcid.org/0009-0002-8880-8305>.

²Cátedras CONAHCYT- TecNM/ITDurango, PBlvd. Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya C.P. 34080, Durango, Dgo. <https://orcid.org/0000-0003-1380-8415>, <https://orcid.org/0000-0002-5313-3494>

³Estancias Posdoctorales para la Formación y Consolidación de las y los Investigadores por México CONAHCyT, PBlvd. Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya C.P. 34080, Durango, Dgo.

*Autora de correspondencia: mgorety@itdurango.edu.mx

RESUMEN

En México, la contaminación del agua por metales pesados representa un grave problema de salud pública. Ante esta preocupación, los investigadores han enfocado sus esfuerzos en la búsqueda de materiales accesibles y de fácil preparación para su uso como bioadsorbentes. Los subproductos agroindustriales, como las hojas y el bagazo de agave provenientes del proceso de elaboración del mezcal, han demostrado ser efectivos en la adsorción de contaminantes debido a su alto contenido de polisacáridos (lignina, celulosa, y hemicelulosa) y grupos funcionales activos. Dado que la producción de mezcal es una de las actividades agroindustriales más importantes en México, estos residuos están disponibles en grandes cantidades, con más de 250 millones de toneladas generadas en los últimos años. Esta revisión tiene como objetivo destacar la aplicación de los residuos de agave como adsorbentes para la remoción de contaminantes del agua, promoviendo un enfoque sostenible dentro de la economía circular.

Palabras clave:

Residuos agroindustriales, Biomasa lignocelulósica, Metales pesados, Recurso hídrico.

ABSTRACT

Water contamination by heavy metals in Mexico is a significant public health issue. To address this problem, researchers are looking for accessible and easy-to-use materials to absorb the contaminants. Agroindustrial by-products, such as agave leaves and bagasse from the mezcal production process, have proven to be effective in adsorbing contaminants due to their high content of polysaccharides (lignin, cellulose, and hemicellulose) and active functional groups. Since mezcal production is one of Mexico's most critical agroindustrial activities, these residues are available in large quantities, with more than 250 million tons generated in recent years. This review aims to highlight the application of agave residues as adsorbents for removing pollutants from water, promoting a sustainable approach within the circular economy.

Keywords:

Agro-industrial waste, Lignocellulosic biomass, Heavy metals, Water resource.



INTRODUCCIÓN

La calidad del agua en México es una preocupación importante debido a la contaminación de diversas fuentes, tanto naturales como antropogénicas. A pesar de los esfuerzos del gobierno y de diversas organizaciones para mejorar la gestión y el tratamiento del agua, muchos cuerpos de agua en el país siguen afectados por contaminantes industriales, agrícolas y domésticos.

La sobreexplotación de acuíferos, el uso de pesticidas y fertilizantes, y vertido inadecuado de residuos son factores que contribuyen a la degradación de la calidad del agua. Además, la escasez de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales en áreas rurales y urbanas agrava el problema. Como resultado, muchas comunidades enfrentan desafíos significativos para acceder a agua potable segura, lo que impacta la salud pública y el desarrollo sostenible del país (OMS, 2023). Por otra parte, la agroindustria en México ha ido ganando relevancia de manera notable en los últimos años. Distintos estudios de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) de 2017, estiman que alrededor de 70 mil empresas agroindustriales procesan aproximadamente la mitad de la producción agrícola del país. Entre los productos agroindustriales donde México destaca a nivel mundial se encuentran la cerveza, el mezcal y el tequila (SADER, 2017). En particular, en los últimos años la producción de mezcal ha mostrado un notable fortalecimiento en varios estados del país.

México cuenta con una superficie aproximada de 19 mil hectáreas dedicadas al cultivo de agave para la producción de mezcal, lo que lo posiciona con un gran potencial en este mercado. Para el año 2022, la producción nacional alcanzó hasta ocho millones de litros, con exportaciones que ascendieron a 6.4 millones de litros, distribuidos a través de 331 marcas comerciales, según datos del Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM, 2023).

El mezcal se clasifica en tres categorías: Mezcal, Mezcal Artesanal y Mezcal Ancestral, con el 89% de la producción perteneciente a la categoría artesanal. Sin embargo, durante el proceso de elaboración, especialmente en las etapas de jimado y fermentación, se generan residuos agroindustriales como hojas y bagazo. Estos residuos, debido a su mala disposición en el suelo, baja tasa de degradación natural y quema a cielo abierto, generan problemas ecológicos y ambientales (Velazquez-Jimenez *et al.*, 2013).

Por su parte, recientemente, investigadores han trabajado en la búsqueda de nuevas alternativas para el aprovechamiento de este tipo de residuos. Entre ellas los bioadsorbentes para la remoción de contaminantes presentes en agua, son una alternativa que cumple estas expectativas, por su elaboración a partir del aprovecha-

miento de los residuos agroindustriales (materiales lignocelulósicos) (Velazquez-Jimenez *et al.*, 2013).

Tal es el caso de un estudio realizado en San Luis Potosí por Velazquez-Jimenez *et al.*, (2013) donde evaluó la capacidad de adsorción del bagazo de agave (*A. salmiana*) para remover Pb (II), Cd (II) y Zn (II) de diferentes muestras de agua. Este enfoque subraya cómo el aprovechamiento de residuos agroindustriales puede reducir el uso de recursos naturales, tanto renovables como no renovables, y contribuir a la solución de problemas antropogénicos, como la mejora de la calidad del agua. Además, gracias a la variada composición de estos residuos o subproductos, es posible su transformación en nuevas alternativas sustentables, lo que abre un abanico de oportunidades para innovaciones en el tratamiento de contaminantes ambientales (García-Mendoza y Talio-Martín, 2007).

Esta revisión proporciona información y estudios recientes sobre el uso de los residuos de la producción del mezcal como biomasa lignocelulósica de bajo costo para la obtención de bioadsorbentes para el tratamiento de agua.

El Agua en México y su calidad

Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2022), el subsuelo mexicano alberga 653 acuíferos. De la precipitación anual que recibe el país, que asciende a 1,449,471 millones de m³, solo el 6.4% se infiltra naturalmente al subsuelo para recargar estos acuíferos. Como resultado, tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) e ingreso (importaciones) de agua con países vecinos, México cuenta anualmente con 461,640 millones de m³ de agua dulce renovable.

Sin embargo, esta cantidad no es suficiente para satisfacer la demanda de la población. Ya que se reporta que, en el 2020, se obtuvieron 111 acuíferos sobreexplotados de los 653 existentes. Ocasionando una fuerte sobreexplotación que ha provocado problemas de contaminación del agua por agentes tóxicos, agravando la situación (DOF, 2010).

También, es importante mencionar que, aunado a esta problemática, actividades productivas como la minería y agricultura han contribuido a la contaminación de agua, mediante la acumulación de material rocoso y sin valor de estas actividades, precipita y lixivia minerales que son tóxicos para el ser humano (Díaz *et al.*, 2021).

Debido a esto, en México el mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb) y cromo (Cr) son considerados los metales más abundantes y tóxicos en el ambiente (Mesias *et al.*, 2022) pues de acuerdo a datos de la Red Nacional de la Calidad del Agua (RENAMECA, 2020), los indicadores de la Calidad del Agua Subterránea 2012-2021 de CONAGUA, de 2,197 sitios monitoreados a nivel nacional se encontró que el 39.3% (rojo) no cumple con los requisitos en relación a la presencia de fluoruros, coli-

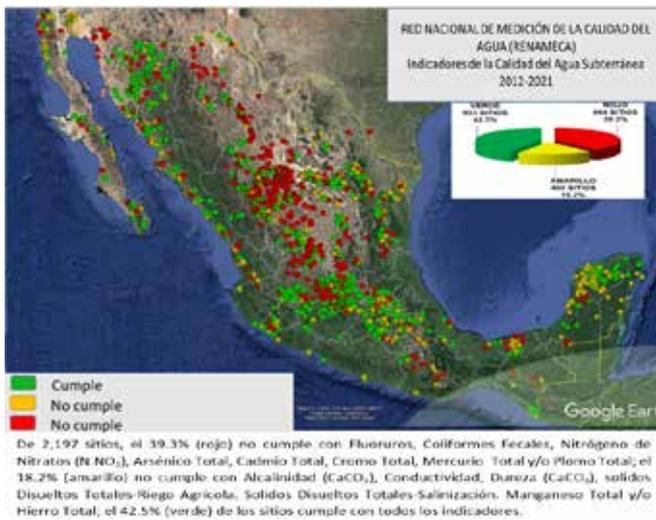


Figura 1. Descripción grafica de los sitios subterráneos de agua en México que están contaminados por metales pesados

formas fecales, nitrógeno de nitratos ($N-NO_3$), arsénico total, cadmio total, mercurio total y plomo total. Por su parte, se encuentra una mayor concentración de estos en la zona norte del país, el cual comprende a los estados de Durango, Coahuila, Chihuahua, Sonora y Zacatecas (Figura 1).

Existe la preocupación por parte de la comunidad científica en dar frente y solución a este tipo de problemas, pues a lo largo del tiempo han desarrollado y empleado diferentes técnicas para la eliminación de metales pesados en el agua, entre ellas precipitación, coagulación, oxidación, microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, tratamiento electroquímico, foto-catálisis y adsorción (Sánchez-Silva et al., 2020). Esta última es una técnica eficiente y económica que de acuerdo a su metodología no solo contribuye a mejorar la calidad del agua, sino que también ofrece una alternativa sustentable al aprovechar residuos agroindustria-

les como bioadsorbentes, alineándose con las crecientes necesidades de tratamiento de agua en el país.

Adsorción una técnica de ayuda a la mejora de la calidad del agua en México

La adsorción es una técnica eficiente y confiable para la purificación del agua. Y es definida como un proceso físico-químico que implica la adhesión de moléculas, iones o partículas presentes en un fluido a la superficie de un sólido, donde el sólido que captura estas especies se denomina adsorbente, y los compuestos que se adhieren a su superficie se llaman adsorbatos (Ayub y Ali, 2021).

El fenómeno de adsorción ocurre debido a la atracción entre las especies químicas en el fluido y la superficie del adsorbente. Estas especies químicas, que pueden estar cargadas positiva o negativamente, se adhieren a la superficie del adsorbente debido a interacciones como fuerzas de Van der Waals, enlaces químicos o interacciones electrostáticas. Y la eficiencia de la adsorción depende de varios factores, como la superficie específica del adsorbente, la naturaleza del adsorbato, el pH del medio, la temperatura y la concentración de los contaminantes (Ayub y Ali, 2021).

En la práctica, la adsorción se utiliza para eliminar una amplia gama de contaminantes del agua, incluidos metales pesados, colorantes, compuestos orgánicos y otros contaminantes tóxicos. La figura 2 ilustra este concepto, mostrando cómo las partículas o iones de los contaminantes se adhieren a la superficie del adsorbente. Dentro de esta técnica, se han desarrollado y empleado varios adsorbentes sintéticos para eliminar los metales del agua contaminada, tales como carbón activado, alúmina activada, resinas de intercambio iónico y compuestos poliméricos. Sin embargo, es importante destacar que estos materiales son costosos y económi-

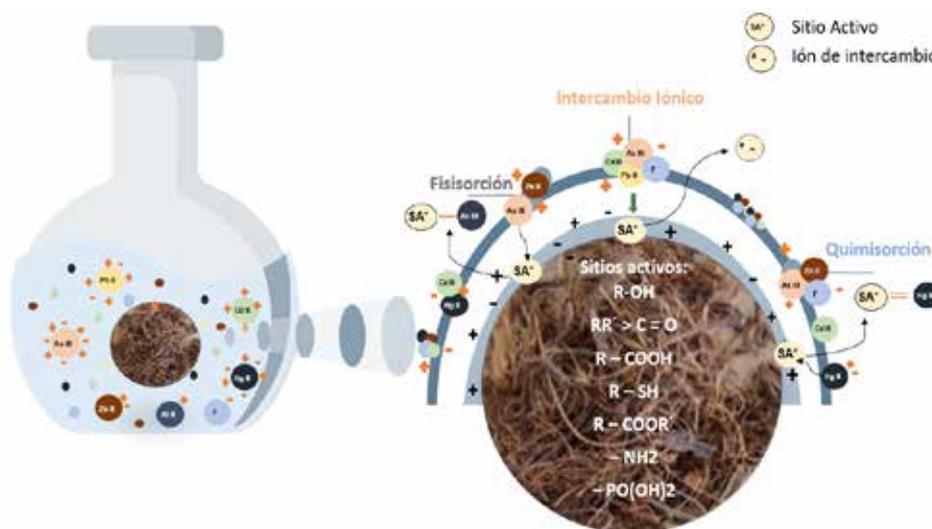


Figura 2. Descripción de los mecanismos de adsorción y procesos de interacción en adsorbentes (hojas y bagazo de agave) para la remoción de contaminantes en el agua

camente inviábiles debido a sus altos costos de inversión, operación y mantenimiento (Sánchez-Silva *et al.*, 2020). Además, que la generación de lodos químicos, representan un gran problema ambiental (Mesias *et al.*, 2022).

Debido a esto, actualmente, la búsqueda de materiales accesibles y de fácil preparación para ser utilizados como adsorbentes para la remoción de distintos contaminantes en medios acuosos y aguas residuales ha sido extensa, el uso de biomásas, en particular derivada de subproductos agroindustriales generados por la agroindustria se han estudiado en gran complejidad, puesto que la generación de estos residuos o subproductos son de bajo costo y fácilmente disponibles (Cortes, 2015).

Residuos agroindustriales del proceso del mezcal en México

De acuerdo a datos de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER 2017) en México la agroindustria está constituida por alrededor de 70 mil empresas que transforman aproximadamente la mitad de la producción del campo. Dentro de las principales actividades primarias que integra la producción son la agrícola, pecuaria y forestal (Sánchez-Silva *et al.*, 2020). Algunos de los productos agroindustriales en los que destaca México en el mundo son: cerveza, mezcal, tequila, chocolate, cereales, azúcar, atún y frutas (SADER, 2017). Siendo la producción de mezcal, una de las actividades agroindustriales más importante en el país, debido a que hay más de 215 especies y están distribuidas en los estados de Oaxaca, Sonora, Coahuila, Durango, Chihuahua y Jalisco (SEMARNAT, 2019).

Estos productos no maderables son aprovechados por ejidatarios; pequeños y grandes productores, para el proceso de elaboración de mezcal artesanal. Ahora bien, dicha riqueza y distribución de agave en casi todo el país, no solo ha hecho a la producción de mezcal la actividad agroindustrial más importante de México,

sino que también, le ha permitido posicionarse en los últimos años con gran potencial para la producción de mezcal en los estados de Oaxaca, Puebla, Durango, Zacatecas, Michoacán, Guerrero, San Luis Potosí, Tamaulipas y Guanajuato, con una certificación de 8 millones de litros de mezcal con un incremento del 700% por encima de las cifras de 2011 Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM, 2023). Sin embargo, esta riqueza y aprovechamiento de agave no solo ha incrementado la producción de mezcal, sino también la generación de residuos agroindustriales procedentes de las diferentes etapas de la elaboración de mezcal como son las vinazas, hojas y bagazo. Las vinazas son residuos líquidos que se originan en el proceso de destilación, se ha estimado que por cada litro de mezcal se generan de 8 a 12 litros de estos líquidos (Díaz, 2021).

Las hojas y bagazo de agave son residuos sólidos procedentes de la etapa de jimado y fermentación. Se calcula que la producción de tan solo un litro de mezcal genera aproximadamente 17 kilogramos de bagazo húmedo, lo anterior significa que tan solo en 2021, la producción nacional de mezcal en México generó alrededor de 136,000 toneladas métricas de bagazo húmedo (Cuadro 1) (COMERCAM, 2023).

Los residuos generados durante la producción de mezcal presentan graves problemas ecológicos y ambientales. Su disposición inadecuada en el suelo, junto con su baja tasa de degradación natural, fomenta la proliferación de fauna nociva. Además, la quema a cielo abierto de estos residuos contribuye a la contaminación atmosférica (Velazquez-Jimenez *et al.*, 2013) Por ello, es crucial encontrar aplicaciones tecnológicas que permitan aprovechar estos residuos de manera efectiva, promoviendo la sostenibilidad y fomentando una economía circular.

En esta revisión, se enfatiza la técnica de adsorción como una solución prometedora para transformar estos residuos en bioadsorbentes. Este enfoque no solo

Cuadro 1. Producción y generación de residuos lignocelulósicos por Estado de acuerdo con la producción de Mezcal en el año 2023 (COMERCAM 2023)

Estado	Subproducto agroindustrial a partir del proceso del mezcal	Producción de mezcal (l/año)	Producción de residuos (toneladas anuales)
Oaxaca	Bagazo de agave	14,165,505	240,813,585
Puebla		500,000	8,500,000
Durango		225,600	3,835,200
Guerrero		150,400	2,556,800
San Luis Potosí		150,400	2,556,800
Michoacán		145,600	2,475,200
Zacatecas		137,600	2,339,200
Tamaulipas		20,800	353,600
Guanajuato		9,600	163,200

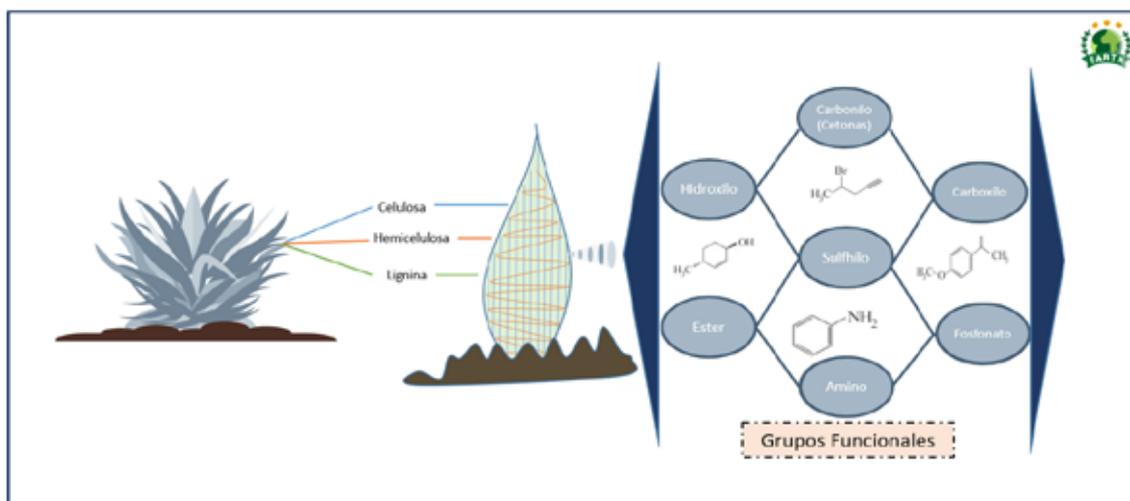


Figura 3. Composición de biomasa lignocelulósica del Agave y sus grupos funcionales asociados

facilita la gestión de los residuos, sino que también contribuye a la remediación de contaminantes en el agua, ofreciendo una alternativa sostenible y beneficiosa para el medio ambiente.

Aprovechamiento de residuos agroindustriales del Mezcal como bioadsorbentes de contaminantes presentes en el agua

Para poder aprovechar, elaborar y tener una adecuada adsorción de contaminantes en el agua a partir de los residuos de Agave se deben considerar diferentes puntos clave. Y uno de estos es la caracterización del material, ya que de acuerdo con la composición química y estructura superficial de los residuos se puede determinar su capacidad de adsorción de contaminantes. Los principales componentes lignocelulósicos de los

residuos de Agave incluyen tres biopolímeros: celulosa (30-50%), hemicelulosa (20-40%) y lignina (15- 25%) entre otros (Sánchez-Silva *et al.*, 2020) (Figura 3).

Donde la celulosa en la planta de agave se compone de una estructura cristalina formada de moléculas de β -glucosa, formando capas denominadas fibrillas de celulosa. La hemicelulosa es una estructura compleja de carbohidratos que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa y arabinosa (pentosas), manosa, glucosa y galactosa (hexosas) y ácidos de azúcar; finalmente la lignina compuesta de diversas sustancias fenólicas (alcoholes), que está presente en la pared celular dando a la planta el soporte estructural, impermeabilidad, y resistencia contra el ataque microbiano, estrés oxidativo e insolubilidad al agua (cuadro 2) (Cortes, 2015).

El aprovechamiento de estos residuos para ser emplea-

Cuadro 2. Principales componentes de las fibras y bagazo de diferente especie de Agaves

Tipo de Agave	Componentes (%)			Métodos para la determinación	Referencia
	Celulosa	Lignina	Holocelulosa		
Bagazo <i>A. tequilana</i> W. var. Azul.	56	19.5	24.5	"Análisis Forrajeros" del ENSAT-INPT (1992)	(Ramírez-Cortina <i>et al.</i> , 2012)
Fibras <i>A. Salmiana</i>	48.94±5.27	8.48±1.78	.....	Klason y EN ISO 13906:2008 (CEN/TC327, 2009)	(De Dios Naranjo <i>et al.</i> , 2017)
Fibras de agave	20.6	18	.....	Klason y Kurschner y Hoffer.	(Hayet <i>et al.</i> , 2021)
Fibras <i>A. sisalana</i>	50.15±0.27	6.23±0.2	81.36±0.07	K. Seifert Jayme-Wise Klason (TAPPI T-222)	(Santiago <i>et al.</i> , 2002)
Bagazo de agave	7.41±2.3	17.52 ± 0.29	48.00±9.21	.....	(López-Nevárez <i>et al.</i> , 2011)
Fibras <i>Agave fourcroydes</i> <i>Lemaire</i>	57.92	6.47	30.50	.....	(Torres Fuentes y Fernández Urquiza, 2016)
<i>A. sisalana</i>	55.6±0.6	8.5±0.7	89.2±0.3	Klason	(Prinsen, 2010)
Bagazo <i>A. tequilero</i>	41.9	7.2	54	.....	(González-García <i>et al.</i> , 2005)

Cuadro 3. Principales grupos funcionales presentes en las estructuras lignocelulósicas de residuos agrícolas (Sánchez-Silva et al., 2020)

Grupo funcional	Fórmula estructural	Átomo ligante	Molécula que lo contiene
Hidroxilo	R-OH	O	PS, SPS, AA, CH
Carbonilo (cetonas)	RR' > C = O	O	PS, PP
Carboxilo	R - COOH	O	AA, FA, PT, AO
Sulfhidrilo (tiol)	R - SH	S	AA, PT
Ester	R - COOR'	O	LP
Amino	- NH ₂	N	AA
Fosfonato	- PO(OH) ₂	O	PL

PS = polisacáridos; SPS = sulfatos; AA = aminoácidos; PL = fosfolípidos; FA = ácidos grasos; CH = carbohidratos; PT = proteínas; LP = lípidos; AO = ácidos orgánicos, PP = péptidos

dos como bioadsorbentes es posible, debido a que la combinación de celulosa, hemicelulosa y lignina presentes en estos residuos crea una matriz robusta con una gran variedad de grupos funcionales (Figura 3), que son cruciales para sus propiedades adsorbentes, permitiendo que estas biomásas interactúen eficazmente con una amplia variedad de contaminantes, incluyendo metales pesados, compuestos orgánicos y otros agentes tóxicos. Entre los principales grupos funcionales presentes en la matriz de los Agave son, para la lignina sitios reactivos aromáticos, mientras que para la celulosa y la hemicelulosa ofrecen numerosos grupos hidroxilo (-OH) y carboxilo (C-O), cadenas alquílicas (CH₃ y CH₂), β-glucosídico etc. (cuadro 3) (Velazquez-Jimenez et al., 2013; Ayub y Ali, 2021).

Estos biopolímeros pueden ser modificados física y químicamente para aumentar la densidad de ciertos grupos funcionales, mejorando su capacidad de adsorción para contaminantes específicos (Ayub y Ali, 2021). Estas modificaciones se llevan a cabo mediante la hidrólisis en la estructura lignocelulósica, es decir, la ruptura de los enlaces de la lignina, celulosa y hemicelulosa mediante tratamientos físicos (mecánicos y térmicos) y tratamientos químicos empleando ácidos o bases, o bien la combinación entre estos (Cortes, 2015).

Tal es el caso del estudio de (Velazquez-Jimenez et al., 2013) donde compararon diferentes tipos de agentes modificadores para el tratamiento del bagazo de agave, informando que los ácidos orgánicos (ácido cítrico, oxálico y tartárico) imponían grupos funcionales débiles e ineficaces que eran responsables de la adsorción de metales. Y en la publicación de Dios Naranjo et al., (2017) en el que emplearon un tratamiento ácido-alcalino en fibras de *A. salmiana* observando una mayor disponibilidad de grupos funcionales comparada con las fibras sin tratamiento. En el cuadro 4 se muestran otros estudios en los que se emplearon distintos tratamientos a fibras y bagazo de agave obteniendo diferentes grupos funcionales con diferentes aplicaciones biotecnológicas.

Los residuos de la producción del mezcal (hojas y bagazo de agave) han demostrado propiedades adsorbentes que han captado la atención de numerosos investigadores

por su potencial uso como medios adsorbentes, especialmente en la remoción de metales pesados del agua. Este interés es particularmente relevante en México, donde la contaminación hídrica por metales pesados representa un grave problema de salud pública (Balderrama-Carmona et al., 2019).

Diversos estudios han evaluado parámetros clave en los procesos de adsorción, tales como el tamaño de partícula, la temperatura, el pH, la concentración del bioadsorbente y el tiempo de contacto entre adsorbato y adsorbente.

Por ejemplo, Velazquez-Jimenez et al. (2013) investigaron la capacidad de adsorción del bagazo de agave (*A. salmiana*) tratado con NaOH, logrando capacidades máximas de adsorción de 50.12 mg/g para Cd (II) y 20.54 mg/g para Zn (II). En otro estudio, Muñoz et al. (2016) evaluaron la eficacia de pellets de agave, tanto carbonizados como sin carbonizar, en la remoción de arsénico (As), obteniendo eficiencias de remoción del 9.96% y 11.20%, respectivamente.

Medellín-Castillo et al. (2017) utilizaron fibras naturales de *A. lechuguilla* para la remoción de Pb (II), obteniendo tasas de remoción del 13.49% a 25°C y del 19.55% a 35°C. Serrato-Rodríguez y Ruiz-Marines (2017) aplicaron bagazo de agave sin modificar como bioadsorbente para la remoción de Cd (II), alcanzando una eliminación del 90%.

Perspectivas futuras del aprovechamiento de residuos de la producción de Mezcal como bioadsorbentes de contaminantes en el agua

Los adsorbentes derivados de residuos de agave son prometedores, ya que, presentan una alternativa ecológica y económica para el tratamiento de aguas contaminadas. Los residuos de agave, como las fibras y el bagazo, son subproductos abundantes y de bajo costo de la industria mezcalera, lo que los convierte en una materia prima ideal para el desarrollo de adsorbentes que facilitan la remoción de diversos contaminantes, incluidos metales pesados como el plomo, cadmio y mercurio, que representan una amenaza significativa para la salud pública y

el medio ambiente en México y otros países.

La utilización de residuos de agave no solo contribuye a la gestión sostenible de desechos agroindustriales, reduciendo la carga ambiental, sino que también ofrece una solución viable y económica para el tratamiento de aguas residuales y de consumo humano. Además, el desarrollo de adsorbentes de Agave se alinea con los principios de la economía circular, promoviendo el uso de residuos como recursos valiosos y fomentando la sostenibilidad en la industria agrícola y de bebidas. Este enfoque no solo reduce los costos asociados con el manejo y disposición de residuos, sino que también genera productos de valor añadido que pueden tener aplicaciones en diversos sectores, incluyendo el tratamiento de aguas, la agricultura y la manufactura (Mesias *et al.*, 2022).

Sin embargo, para que esta estrategia se materialice a gran escala, es necesario superar una serie de retos técnicos, económicos y regulatorios, a través de la investigación continua, la innovación y la colaboración interdisciplinaria.

En el futuro, será crucial enfocarse en la investigación orientada a la optimización y escalabilidad de los proce-

dos de producción de adsorbentes derivados de residuos de agave. Este enfoque permitirá mejorar los tratamientos de activación, incrementando la capacidad adsorbente de estos materiales sin generar subproductos dañinos ni requerir grandes cantidades de energía. Además, el escalado de la producción requerirá el desarrollo de tecnologías capaces de manejar grandes volúmenes de residuos y de integrar estos materiales en los sistemas de tratamiento de aguas ya existentes, lo que podría ampliar significativamente su aplicación industrial.

La innovación en materiales compuestos también representa una dirección prometedora. Integrar los residuos de agave en matrices con nanomateriales, biopolímeros o sustancias químicas podría resultar en adsorbentes de alta eficiencia, con capacidades mejoradas para la remoción de diversos contaminantes. Este enfoque no solo aumentaría la eficacia de los adsorbentes, sino que también abriría nuevas posibilidades para su aplicación en diferentes contextos de tratamiento de agua (Othman *et al.*, 2024).

La adopción de principios de sostenibilidad y economía circular es otro aspecto fundamental. Este enfoque no

Cuadro 4. Estudios reportados por distintos autores para subproductos agroindustriales de fibras y bagazo de agave sometidos a diferentes tratamientos modificando sus grupos funcionales

Tipo de agave	Tipo de tratamiento	Grupos funcionales presentes	Aplicación	Referencia
<i>Agave Lechuguilla Torr.</i>	Estado natural	OH-, CH, C-O, C=O	Bioadsorbente para remoción de Pb (II)	(Medellín-Castillo <i>et al.</i> , 2017)
Hojas y Bagazo de <i>Agave durangensis</i>	Ultrasonido	OH, C=O, C=C, C-O, β-glucosídico	Producción potencial de enzimas	(Contreras Hernández <i>et al.</i> , 2018)
Bagazo de Agave crudo y tratado	Acido (HCL)	CO, CH ₃ , CH ₂ , OH, (COO)-	Adsorbente de cationes metálicos	(Velazquez-Jimenez <i>et al.</i> , 2013)
Fibras <i>Agave salmiana</i>	ácido-álcali con presión	C-O-C, O-H, CH ₂ , C-O, C=O	Caracterización de agave	(De Dios Naranjo <i>et al.</i> , 2017)
<i>Agave angustifolia Haw</i> <i>Agave lechuguilla Torr.</i> <i>Agave salmiana B. Otto Ex Salm-Dick</i> <i>Agave tequilana Weber, Var. Azul</i>	Estado natural	OH, CH ₂ , CH ₃ , C-O, C=O, C=C, Grupos aromáticos	Obtención de pulpa de celulosa para elaboración de papel	(Jiménez-Muñoz <i>et al.</i> , 2016)
Bagazo de Agave	Térmicos y termoquímicos	OH, CH ₃ CH ₂ , C=O, C-O	Uso como fuente de energía	(León, 2017)
<i>Agave tequilana</i>	Alcalino, organosolv y secuencial	OH, CH ₃ , CH ₂ , C=O, C-O, grupos aromáticos	Extracción de lignina y producción de metano.	(Maytorena, 2018)
Agave y bagazo <i>tequilana Webber</i>	Natural	O-H, C-H, C=O, C=C, N-O, C-O-C, grupos aromáticos	Caracterización de las diferentes etapas de descomposición del bagazo	(Íñiguez <i>et al.</i> , 2011)
<i>Agave angustifolia</i>	Polimerización	OH, CH ₃ , CH ₂ , C-O, C-C-C, C-O, C-O-O	Potencial prebiótico de los fructanos	(Velázquez-Martínez <i>et al.</i> , 2014)
<i>Agave tequilana Weber var. Azul</i>	Jarabe fabricado	OH, C-H, C=O, C=C, C-O	Flóculos presentes en jarabe de agave:	(De la Mora-Amutio, 2004)

solo aprovecharía los residuos de agave como materia prima, sino que también permitiría su reciclaje y reutilización tras su uso, reduciendo los desechos y promoviendo ciclos de uso más sostenibles. De este modo, se maximizaría el valor de estos materiales a lo largo de su vida útil, minimizando su impacto ambiental (Othman *et al.*, 2024).

Finalmente, es esencial fomentar la investigación multidisciplinaria y colaborativa entre científicos, ingenieros, economistas, y legisladores. Esta colaboración permitirá superar las barreras técnicas y socioeconómicas que puedan surgir, asegurando una implementación adecuada de estos adsorbentes. Al promover soluciones integrales y sostenibles, se contribuirá no solo a mejorar la calidad del agua, sino también a impulsar el desarrollo económico y social en las regiones productoras de mezcal, convirtiendo estos esfuerzos en un modelo de innovación y sostenibilidad a nivel global.

CONCLUSIÓN

Los adsorbentes derivados de residuos de agave no solo abordan el problema de la contaminación del agua de manera efectiva, sino que también promueven prácticas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Al transformar un residuo agrícola en un recurso útil para la purificación del agua, se crea un ciclo íntegro que mejora la calidad de vida, protege los recursos naturales y fomenta el desarrollo económico en las regiones productoras de mezcal. Esto convierte a los adsorbentes de agave en una solución integral y prometedora para enfrentar los desafíos actuales y futuros relacionados con la contaminación hídrica.

LITERATURA CITADA

AYUB, A. and Ali, Z., 2021. Arsenic removal approaches: A focus on chitosan biosorption to conserve the water sources. *International Journal of Biological Macromolecules*, 192(February), pp.1196–1216. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.050>.

BALDERRAMA-CARMONA A. P., Bisher-Álvarez Y., Silva-Beltrán N. P., Ayala-Parra P. A., Felipe-Ortega-Fonseca X. 2019. Estimating the health risk assessment of the consumption of *Oreochromis niloticus*, tap water, surface water and prey sediments, contaminated with heavy metals in communities close to a copper mine and to Adolfo Ruiz Cortines dam, in Sonora, Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 6 (spe). Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-33802019000200201&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.mx/pdf/revbio/v6nspe/2007-3380-revbio-6-spe-e522.pdf.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA), 2022. *Estadísticas del Agua en México 2021*. Comisión Nacional del Agua. Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>.

CONSEJO MEXICANO REGULADOR DE LA CALIDAD DEL MEZCAL (COMERCAM), 2023. *INFORME ESTADÍSTICO*. Disponible en: https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/INFORME-2023_PUBLICO.pdf [Accessed 13 April 2024].

CONTRERAS-HERNÁNDEZ, M. G., Ochoa-Martínez, L. A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Rocha-Guzmán, N. E., Lara-Ceniceros, T. E., Contreras-Esquivel, J. C., and Rutiaga-Quiñones, O. M. 2018. Effect of ultrasound pre-treatment on the physicochemical composition of *Agave durangensis* leaves and potential enzyme production. *Bioresource Technology*, 249, 439-446. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.009>

CORTES, W., 2015. Tratamientos aplicables a materiales lignocelulósicos para la obtención de etanol y productos químicos. *Revista de Tecnología*, 13, pp.39–44. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6041572>.

Diario Oficial de la federación (DOF), 2010. *Secretaría de Gobernación, 2010*. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5150942&fecha=07/07/2010#sc.tab=0 (Consultado: el 12 de abril de 2024).

DÍAZ, L. A. O., Cuevas, L. R., del Palacio, M. M., & Salas, A. M. B. 2021. Agua Potable Segura, Libre De Arsénico Y Flúor. *ResearchGate.Net*, (febrero).

DÍAZ, S.P., 2021. *Residuos de agave en el proceso de producción de mezcal artesanal en el valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Tesina. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Disponible en: <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/2316/SUPEDI01T.pdf>.

NARANJO, C. D. D., Alamilla-Beltrán, L., Gutiérrez-López, G. F., Terres-Rojas, E., Solorza-Feria, J., Romero-Vargas, S., y Mora-Escobedo, R. 2017. Aislamiento y caracterización de celulosas obtenidas de fibras de Agave salmiana aplicando dos métodos de extracción ácido-alcalí. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(1), pp.31–43. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i1.368>.

DE LA MORA-AMUTIO, M., 2004. Flóculos presentes en jarabe de agave: caracterización, identificación y determinación del origen de sus componentes, pp.1–74.

GARCÍA-MENDOZA, A. y Talio-Martin, J., 2007. Los agaves en México. *Universidad Nacional Autónoma de México*, 1, pp.4–10.

GARCÍA, Y. G., Reynoso, O. G., & Arellano, J. N. 2005. Potencial del bagazo de agave tequilero para la producción de biopolímeros y carbohidrasas por bacterias celulolíticas y para la obtención de compuestos fenólicos, eGnosis, 3(1), p. 18. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73000314>.

HAYET, S., Sujan, K. M., Mustari, A., & Miah, M. A. 2021. Hemato-biochemical profile of turkey birds selected from Sherpur district of Bangladesh. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 8(6), pp.1–5. Disponible en: <https://doi.org/10.22192/ijarbs>.

MUÑOZ, A. H. S., García, M. G. M., García, F. A. V., Luna, B. N., Molina, A. Z., Li, Y., y Castrejón, U. E. R. 2016. Uso

- potencial de pellets para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico en comunidades de Xichú, Gto., México. *Revista de Agroquímica*, 26, pp.22–32. Disponible en: <https://doi.org/10.15174/au.2016.1502>.
- Íñiguez, G., Valadez, A., Manríquez, R., y Moreno, MV. 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), pp.61–74.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, E., Prieto-García, F., Prieto-Méndez, J., Acevedo-Sandoval, O. A., y Rodríguez-Laguna, R. 2016. Caracterización fisicoquímica de cuatro especies de agaves con potencialidad en la obtención de pulpa de celulosa para elaboración de papel. *DYNA (Colombia)*, 83(197), pp.233–243. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n197.52243>.
- León, N.C.U., 2017. Caracterización de los productos obtenidos del proceso de pirólisis de residuos lignocelulósicos de agave y su uso como fuente de energía. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Disponible en: https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1165/1/PCER_M_Tesis_2017_Uc_Natalia.pdf.
- LÓPEZ-NEVÁREZ, A. G., Rojas-Rejón, O. a, Ponce-Noyola. 2011. Caracterización de sustratos lignocelulósicos: bagazo de agave, bagazo de caña y olote de maíz para la producción enzimática de azúcares. *Revista de Investigación de Recursos Naturales*, 83(2010), p.57473800.
- MAYTORENA, L.C.M., 2018. Biorrefinería del bagazo de *Agave tequilana*: extracción de lignina por diferentes pretratamientos y producción de metano. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Disponible en: <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/4779/TMIPICYTM4B52018.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
- MEDELLÍN-CASTILLO, N. A., Hernández-Ramírez, M. G., Salazar-Rábago, J. J., Labrada-Delgado, G. J., y Aragón-Piña, A. 2017. Bioadsorción de plomo (II) presente en solución acuosa sobre residuos de fibras naturales procedentes de la industria ixtlera (*Agave lechuguilla* Torr. Y *Yucca carnerosana* (Trel.) McKelvey). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(2), pp.269–280. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.02.08>.
- MESIAS, G. G., Shakai, G. S., Martínez, S. P., y Pilco, C. J. 2022. Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *Studies in Environmental and Animal Sciences*, 3(3), pp.1590
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS), 2023. Agua para consumo humano, 13 de septiembre 2023. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/drinking-water>.
- OTHMAN, J. A. S., Ilyas, R. A., Nordin, A. H., Ngadi, N., & Alkbir, M. F. M. 2024. Recent advancements in bamboo nanocellulose-based bioadsorbents and their potential in wastewater applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277, 134451. Disponible en: <https://doi.org/10.54020/seasv3n3-022>.
- PRINSEN, P., 2010. Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/66265>.
- RAMÍREZ-CORTINA, C.R., Alonso-Gutiérrez, M.S. and Rigal, L., 2012. Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de rumiantes. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(3), pp.449–457. Disponible en: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.08.059>.
- RED NACIONAL DE LA CALIDAD DEL AGUA (RENAMECA), 2020. *Indicadores de la calidad del agua superficial y subterránea de CONAGUA 2021*. Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/Ica20/Contenido/Documentos/PresentaciondeIndicadoresd>
- SÁNCHEZ-SILVA, J. M., González-Estrada, R. R., Blancas-Benitez, F. J., y Fonseca-Cantabrana, Á. 2020. Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.261>.
- SANTIAGO, D.I., Rodríguez De García, N. y Mogollón, G. 2002. Potencial papelero de la fibra de sisal (*Agave sisalana*). *Rev. Forest. Venez*, 46(2), pp. 19–27.
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (SADER) (2017) *Agroindustria, motor de desarrollo*. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/agroindustria-motor-de-desarrollo> (Consultado: el 12 de mayo de 2024).
- SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN (2010) Acuerdo por el cual se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero Valle del guadiana, en el estado de Durango. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5150942&fecha=07/07/2010#gsc.tab=0.
- SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT) (2019) *Agaves, maravillosas y magnánimas plantas*. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/agaves-maravillosas-y-magnanimas-plantas> (Consultado: el 9 de mayo de 2024).
- SERRATO RODRÍGUEZ, J. y Ruiz Marines, A. 2017. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, *Mundo Nano*. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología, 9(17), p. 49. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2016.17.58151>
- MESIAS, G. G., Shakai, G. S., Martínez, S. P., y Pilco, C. J. 2022. Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *Studies in environmental and animal sciences*, 3(3), 762–783. Disponible en: <https://doi.org/10.54020/seasv3n3-022>
- TORRES FUENTES Y FERNÁNDEZ URQUIZA, F. 2016. Estudio de la influencia del medio alcalino en la estructura y elongación de las fibras de henequén (*Agave fourcroydes Lemaire*), *Revista Digital Del Cedex (181)*, 89. Disponible en:

<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/439>.

VELAZQUEZ-JIMENEZ, L.H., Pavlick, A. y Rangel-Mendez, J.R. 2013. Chemical characterization of raw and treated agave bagasse and its potential as adsorbent of metal cations from water”, *Industrial Crops and Products*, 43(1), pp. 200–206. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ind-crop.2012.06.049>.

VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ, JR, González-Cervantes, RM, Hernández-Gallegos, MA, Campos Mendiola, R., Jiménez Aparicio, AR, y Arenas Ocampo, ML. 2014. *Prebiotic potential of Agave angustifolia haw fructans with different degrees of polymerization*, *Molecules*, 19(8), pp. 12660–12675. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/molecules190812660>.