Ingeniería y Competitividad
Vol 28 (3) 2026 doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

Vol 28 (3)

ISSN
0123-3033
e- 2027-8284

Artículo de Revisión

Materiales de origen biológico para la remediación ambiental de aguas contaminadas con tartrazina: una revisión

Biological-Origin Materials for the Environmental Remediation of Tartrazine-Contaminated Water: A Review

Ikodiya Orji[1] Idongesit Effiong Ekpoi[1]

[1]University of Port Harcourt, Port Harcourt, Nigeria.

Resumen

Introducción: La presencia persistente de tartrazina (FDC Yellow) en entornos acuáticos, derivada de su uso generalizado en las industrias alimentaria, textil, farmacéutica y cosmética, conlleva riesgos para el medio ambiente y la salud pública. Se requieren alternativas más económicas y respetuosas con el medio ambiente, dado que las tecnologías de remediación convencionales resultan costosas de operar y presentan una sostenibilidad limitada.
Objetivo: Esta revisión narrativa evalúa el progreso de la investigación en los últimos 25 años sobre la adsorción mediante materiales de origen biológico para la eliminación de tartrazina. El propósito es analizar dichos adsorbentes, identificar materiales de alta eficiencia, señalar los obstáculos técnicos y detectar las lagunas de conocimiento que dificultan su aplicación a escala industrial.
Métodos: Se realizó una búsqueda bibliográfica centrada en estudios publicados entre 2000 y 2025, utilizando las bases de datos OpenAlex, Google Scholar y DOAJ. Los bioadsorbentes se clasificaron en subproductos agrícolas, carbonos derivados de biomasa y polímeros naturales, prestando especial atención a los métodos de preparación, los mecanismos de adsorción y el rendimiento bajo diversas condiciones operativas.
Resultados: Los adsorbentes basados en carbono —activados química o térmicamente—, con capacidades de adsorción de 110 a 1136 mg g□¹, ofrecen un mejor desempeño que los residuos agrícolas sin modificar (como la cascarilla de arroz o el bagazo de caña de azúcar), los cuales presentan capacidades moderadas, situadas entre 1 y 91 mg g□¹. No obstante, persisten desafíos importantes en cuanto a la regeneración de los adsorbentes, su estabilidad mecánica, la variabilidad entre lotes y la escalabilidad industrial.
Conclusiones: La adsorción mediante materiales de origen biológico ha demostrado un potencial considerable para la eliminación de tartrazina a escala de laboratorio. La investigación futura debe centrarse en el desarrollo de materiales compuestos híbridos, sistemas de flujo continuo y evaluaciones técnico-económicas integrales, con el fin de facilitar la transición de estas innovaciones hacia aplicaciones prácticas en el tratamiento de agua.

Palabras clave: Adsorción; colorantes azoicos; biocarbón; biopolímeros; tartrazina; tratamiento de aguas residuales.

Abstract

Introduction: The persistent presence of tartrazine (FDC Yellow) in aquatic environments as a result of its widespread use in the food, textile, pharmaceutical, and cosmetic industries poses ecological and public health risks. Cheaper, eco-friendly alternatives are needed because conventional remediation technologies are costly to operate and have limited sustainability.
Objective: This narrative review evaluates research progress over the past 25 years in bio-based adsorption for tartrazine removal, aiming to assess bio-based adsorbents, identify high-efficiency materials, highlight technical bottlenecks, and identify knowledge gaps that hinder industrial application.
Methods: A literature search focusing on studies published between 2000 and 2025 was conducted using OpenAlex, Google Scholar, and DOAJ. The bio-adsorbents were categorised into agricultural by-products, biomass-derived carbons, and natural polymers, with emphasis on preparation methods, adsorption mechanisms, and performance under varying operating conditions.
Results: Chemically or thermally activated carbon-based adsorbents with capacities of 110-1136 mg g-1 offer better performance than unmodified agricultural residues such as rice husk and sugarcane bagasse, which exhibit moderate adsorption capacities between 1 and 91 mg g-1. However, substantial challenges remain in adsorbent regeneration, mechanical stability, batch-to-batch variability, and industrial scalability.
Conclusions: Bio-based adsorption has demonstrated considerable potential for tartrazine removal at the laboratory scale. Future research must focus on developing hybrid composite materials, continuous-flow systems, and comprehensive techno-economic assessments to transition these innovations into practical water treatment applications.

Keywords: Adsorption; Azo dyes; Biochar; Biopolymers; Tartrazine; Wastewater treatment.

¿Cómo citar?

Orji I, Ekopoi IE. Materiales de origen biológico para la remediación ambiental de aguas contaminadas con tartrazina: una revisión. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(3)e-30316132

https://doi.org/10.25100/iyc.v28i3.16132

Recibido: 06/9/26
Revisado: 9/11/26
Aceptado: 23/11/26
Online: 24/11/26

Correspondencia

ikodiyaorji@gmail.com

CrossMark

BY NC SA

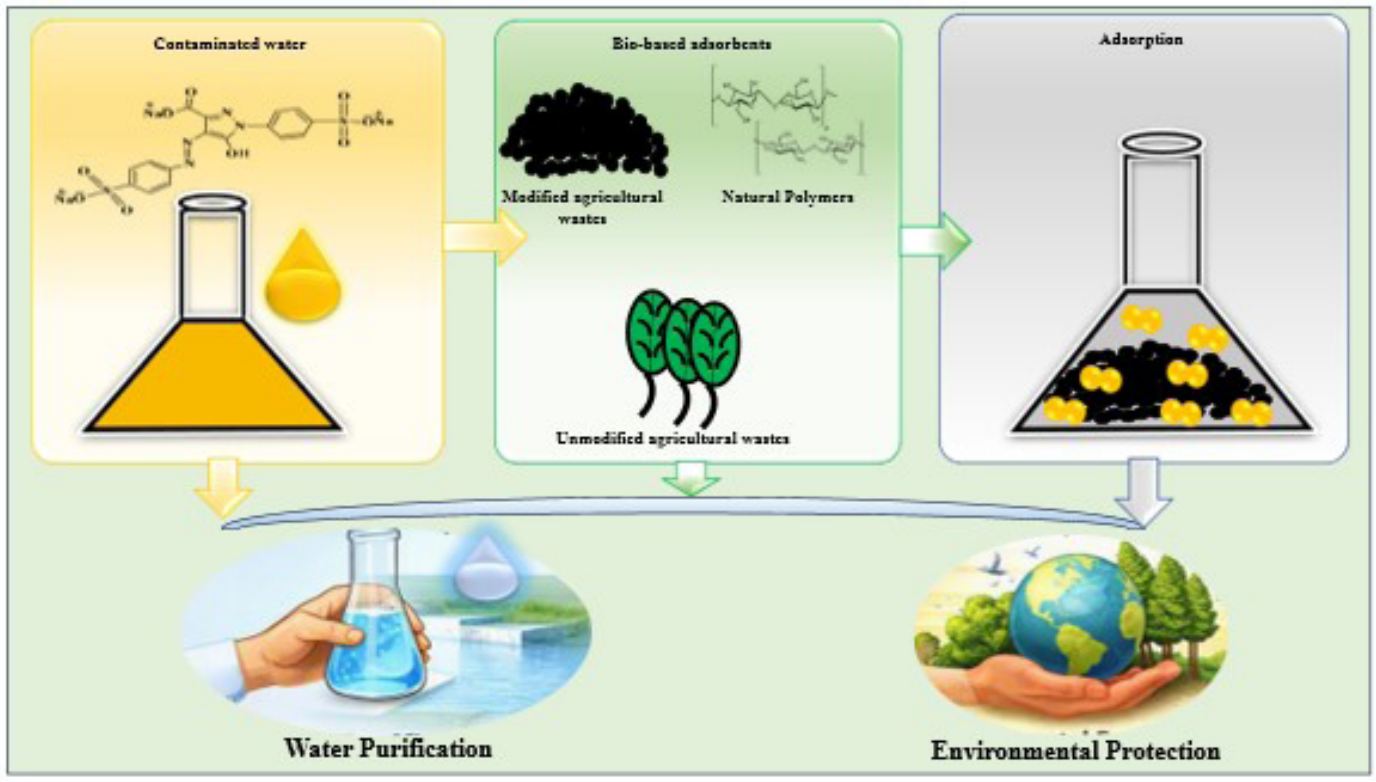
OPEN ACCESS

¿Por qué se realizó el estudio?
La revisión surgió debido a la preocupación de que la tartrazina —un colorante azoico sintético de uso generalizado— pueda representar riesgos para la salud humana y los ecosistemas acuáticos. Asimismo, responde a la creciente necesidad de contar con métodos eficaces, sostenibles y respetuosos con el medio ambiente para tratar el agua contaminada con tartrazina. El estudio tuvo como objetivo resumir los avances recientes en tecnologías de adsorción de base biológica para la eliminación de la tartrazina, así como evaluar sus aplicaciones ambientales, los desafíos que plantean y sus perspectivas futuras.

¿Cuáles fueron los hallazgos principales?
La revisión reveló que muchos adsorbentes de base biológica —tales como subproductos agrícolas, materiales derivados de la biomasa y polímeros naturales— eliminan eficazmente la tartrazina del agua. El proceso de adsorción resulta más eficiente en condiciones ácidas; además, los materiales de base biológica modificados suelen presentar una capacidad de adsorción significativamente mayor que los no modificados. No obstante, la variabilidad en las propiedades de los adsorbentes, las dificultades para su regeneración y los retos relacionados con la escalabilidad siguen siendo obstáculos para su aplicación a nivel industrial.

¿Qué aportan estos resultados?
Los hallazgos proporcionan una comprensión integral de la adsorción de base biológica como un enfoque rentable, sostenible y respetuoso con el medio ambiente para la eliminación de la tartrazina. El estudio identifica adsorbentes prometedores, subraya las limitaciones existentes y señala líneas de investigación futuras que podrían contribuir al desarrollo de tecnologías escalables para el tratamiento de aguas residuales y a la protección del medio ambiente.

Graphical Abstract



doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

Introducción

La tartrazina es un tinte azoico sintético soluble y aniónico, también conocido como FDC Yellow, que se utiliza ampliamente en las industrias alimentaria, textil, papel, plástica, cuero, cosmética y farmacéutica (1). Su amplia aplicación y persistencia en medios acuáticos han convertido las aguas residuales contaminadas con tartrazina en un problema urgente que las opciones de tratamiento tradicionales tienen dificultades para resolver de forma asequible (2,3). Varios investigadores han indagado el perfil toxicológico de la tartrazina (Figura 1) a lo largo de los años, y estudios ecotoxicológicos han demostrado sus efectos tóxicos sobre organismos acuáticos, incluyendo anomalías morfológicas documentadas en el desarrollo embrionario y respuestas al estrés oxidativo en modelos de peces (4).

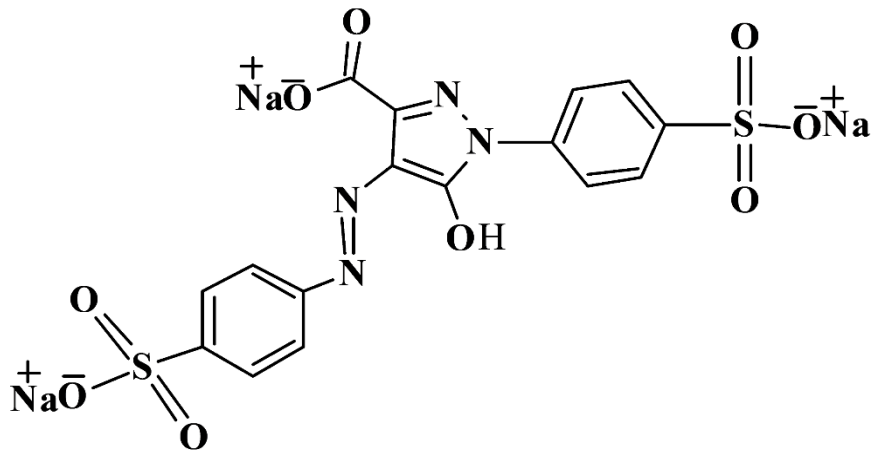


Figura 1. Estructura de la tartrazina (**Fuente:** Autores, redibujado a partir de la estructura de PubChem).

Técnicas avanzadas como la filtración por membrana y la oxidación química, que pueden descomponer o atrapar el tinte, a menudo requieren grandes aportaciones energéticas o producen residuos secundarios peligrosos, además de elevados costes (5). Aunque la adsorción estándar evita estos desafíos operativos, el carbón activado (AC) comercial es costoso para su uso generalizado en zonas con recursos limitados como África (6). La conversión de residuos agrícolas y marinos en materia bruta en adsorbentes funcionales para la remediación de medios acuosos contaminados con tartrazina ofrece una forma práctica de producir soluciones sostenibles y de bajo coste para el tratamiento del agua y resolver simultáneamente los desafíos de gestión de residuos (7,8).

Esta revisión narrativa de los avances en la investigación de las últimas dos décadas y media sobre la adsorción biobasada para la remediación con tartrazina tiene como objetivo proporcionar una evaluación estructurada de los adsorbentes bio-baseados, identificar los biosorbentes con mayor eficacia de eliminación para tartrazina, descubrir los mecanismos fisicoquímicos que rigen la adsorción de tartrazina sobre estos materiales e identificar los cuellos de botella técnicos, limitaciones estructurales y lagunas de conocimiento existentes actualmente en la literatura que deben resolverse para avanzar en la tecnología de adsorción de tartrazina biobasada. Con este fin, la revisión describe los tipos existentes de biomasa,

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

evalúa su comportamiento operativo, identifica desafíos para la adopción industrial generalizada y describe prioridades de investigación futuras para apoyar prácticas de gestión sostenible del agua.

Metodología

La literatura de esta revisión se recopiló mediante búsquedas dirigidas en bases de datos académicas, principalmente OpenAlex, complementadas por Google Scholar y el Directorio de Revistas de Acceso Abierto (DOAJ). OpenAlex fue elegido por su amplia cobertura interdisciplinar y su naturaleza de acceso abierto, que permite la recuperación de metadatos sin barreras (9). Se utilizaron Google Scholar y DOAJ para capturar estudios adicionales relevantes y textos completos de acceso abierto. En lugar de realizar una revisión sistemática formal con marcos rígidos de cribado PRISMA o puntuación de calidad por riesgo de sesgo, utilizamos un enfoque narrativo basado en búsquedas (Figura 2) para identificar, seleccionar, agrupar y discutir la literatura representativa clave sobre la adsorción de tartrazina bio-base durante las últimas dos décadas y media.

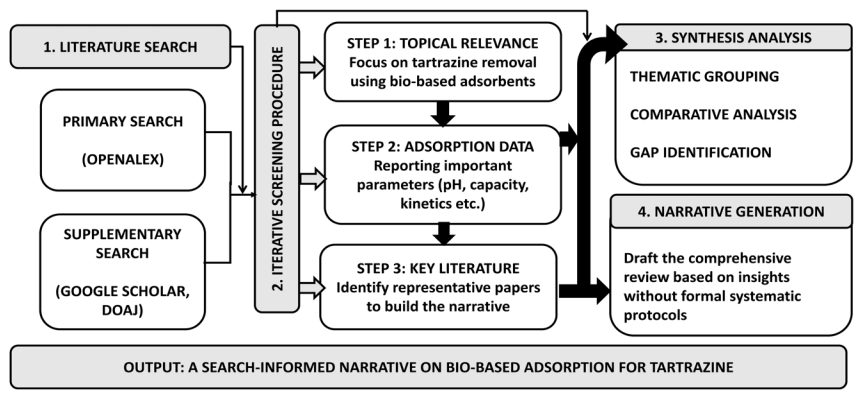


Figura 2. Marco metodológico para la búsqueda bibliográfica.

La búsqueda se llevó a cabo de junio a diciembre de 2025, utilizando los términos de búsqueda "tartrazina", "adsorción de tartrazina", "biosorción de tartrazina", "carbonos derivados de biomasa", "adsorbentes de base biológica", "tartrazina de biochar", "adsorción de residuos agrícolas", "tartrazina de alginato", "tartrazina de quitosano", "eliminación de colorantes de polímeros naturales", "remediación de tartrazina", "biosorbentes modificados" y "adsorción de colorantes aniónicos", combinados con los operadores booleanos "AND" y "OR".

Los criterios de elegibilidad incluían artículos de revistas revisadas por pares, ponencias de congresos, artículos de revisión y capítulos de libros publicados en inglés entre 2000 y 2025. Se excluyeron los estudios no relacionados con la adsorción de tintes de tartrazina, registros duplicados, fuentes no académicas y publicaciones que carecieran de detalles experimentales o de revisión suficientes. A continuación, se seleccionaron 65 artículos de un conjunto inicial de 329 registros para esta revisión.

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

Resultados y discusión

Investigaciones recientes se han centrado en desarrollar sorbentes alternativos y asequibles con propiedades adsorbentes consistentes, alto potencial de regeneración, estabilidad a lo largo de ciclos repetidos de adsorción y desorción y rendimiento en efluentes reales de aguas residuales para reducir la dependencia de materiales adsorbentes costosos que carecen de estas propiedades (10,11). Sin embargo, Seleccionar un adsorbente adecuado para eliminar la tartrazina de una solución acuosa requiere un buen conocimiento de la naturaleza fisicoquímica y las propiedades del adsorbente para mejorar la eficacia en la eliminación de colorantes (8,12). Los investigadores han estudiado diferentes categorías de adsorbentes de base biológica para eliminar tartrazina de medios acuosos con distintos grados de éxito. Pero en este artículo, los adsorbentes derivados de biomasa son materiales obtenidos de materias primas biológicas renovables, aunque sus propiedades fisicoquímicas puedan haber sido modificadas mediante procesos térmicos o químicos. Para esta revisión, se clasificaron como subproductos agrícolas, materiales derivados de biomasa y polímeros naturales. Cada una de estas categorías se discute en las secciones siguientes.

Subproductos agrícolas

Las investigaciones sobre la adsorción de tartrazina utilizando subproductos agrícolas eran relativamente escasas antes de 2010. Inicialmente, las investigaciones sobre la adsorción de tintes utilizando materiales agrícolas sin tratar no se centraron específicamente en la tartrazina. Aun así, establecieron la base mecanicista para aplicar posteriormente biomasa no modificada en la remediación con tartrazina.

En uno de esos estudios en las últimas dos décadas, Annadurai et al. (13) demostró que las cáscaras de plátano y naranja sin tratar podían adsorber eficazmente varios tintes sintéticos a partir de solución acuosa, con capacidades de adsorción que alcanzaban los 17,2 mg^{-1} para naranja metilica bajo condiciones optimizadas. Los autores atribuyeron el comportamiento de adsorción a la matriz porosa lignocelulósica y a los grupos funcionales que contienen oxígeno de forma natural en la superficie de biomasa. Aunque el estudio no investigó directamente la tartrazina, proporcionó evidencia de respaldo de que los agrorresiduos no tratados pueden adsorber colorantes azoicos aniónicos sin modificaciones extensas.

La última década ha visto un crecimiento considerable en este área de investigación, reflejando una mayor conciencia sobre la persistencia ambiental de la tartrazina y el potencial de los materiales adsorbentes renovables. Por tanto, las siguientes secciones se centran en la última década, que representa la mayor parte de la literatura disponible.

Las piedras de masau presentaron capacidades de 51,3-65,1 mg g^{-1}, con FTIR confirmando los grupos hidroxilo y carboxilo como sitios de unión para interacciones electrostáticas y de enlace de hidrógeno (14). Estudios recientes sobre residuos tropicales como cáscara de arroz, caña de azúcar, melocotón, yuca y mesocarpo de coco reportan capacidades moderadas de 1,24 a 3,55 mg^{-1} y eficiencias de eliminación del 74 al 95 %, respectivamente (5,15). Adsorbentes compuestos combinados Capparis decidua y la cáscara de huevo alcanzó 50,97 mg g^{-1} para tartrazina en sistemas de tintes mixtos (16).

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

Como se muestra en la Tabla 1, la mayoría de los estudios indican que la adsorción de tartrazina se favorece a pH 2-3 debido a la atracción electrostática entre los sitios superficiales adsorbentes protonados y los grupos sulfonato cargados negativamente de la tartrazina (17). Capacidad máxima de adsorción (Q_{Max}) varía ampliamente entre adsorbentes, desde 1,24 mg g^{-1} Para cáscara de arroz dos 91,27 mg^{-1} para Moringa oleifera. Estas diferencias resultan de variaciones en el área superficial, la estructura de los poros, los grupos funcionales superficiales y la afinidad del adsorbente por la tartrazina.

También se observaron diferencias sustanciales en la dosis del adsorbente (0,2-25 g). Esto indica variaciones en la eficiencia de adsorción y en el diseño experimental de los investigadores. La baja dosis de Moringa oleifera (0,2 g) arrojó la mayor capacidad de adsorción reportada (91,27 mg g^{-1}), lo que indica que el adsorbente utiliza sus sitios de adsorción de forma más eficiente que otros adsorbentes como la bagaza de caña de azúcar, que alcanzó una adsorción máxima de 2,5 mg g^{-1} con 10 g de adsorbente.

Concentraciones iniciales de tartrazina (10-100 mg L^{-1}) también difieren entre distintos estudios de adsorbentes. Esto puede afectar la capacidad aparente de adsorción porque gradientes de concentración más altos proporcionan una fuerza impulsora más fuerte para la transferencia de masa desde la solución a la superficie adsorbente (18). Los tiempos de equilibrio oscilan entre 60 y 240 min, lo que sugiere diferencias en las tasas de adsorción debido a variaciones en las propiedades de los poros o en la resistencia a la difusión. La mayoría de los estudios encontraron que la adsorción seguía el modelo cinético pseudo-de segundo orden, lo que indica que la tasa de adsorción depende de la disponibilidad de sitios de adsorción. Aunque el modelo isotermal mejor ajustado varía entre adsorbentes, la frecuente aplicabilidad de los modelos de Langmuir y Freundlich sugiere que, dependiendo de las características del adsorbente, tanto la adsorción monocapa como la heterogeneidad superficial contribuyen a la absorción de tartrazina.

Tabla 1. Subproductos agrícolas para la eliminación de tartrazina.

Adsorbente	Qmax (mg g^{-1})	pHopt	Dosis(g)	Co (mg L^{-1})	Teq (mín)	Isotermia	Cinética	Referencia
Piedras de Masau	65.1	2	4	100	NR	Freundlich y Redlich-Peterson	PSO	(14)
Moringa oleifera	91.27	3	0.20	15	240	Amistoso	PFO	(19)
Cáscara de arroz	1.24	2	1	50	120	Langmiur	PSO	(5)
Cáscara de coco	NR	4	25	70	NR	Langmuir & Freundlich	NR	(11)
Bagazo de caña de azúcar	2.45	2	10	10	120	Brouers-Sotolongo	PSO	(20)
Cáscara de arroz	3.55	2	10	10	120			

NR = no reportado; Qmax = capacidad máxima de adsorción; PSO = seudo-segundo-orden; PFO = pseudo-primer orden; C_o = concentración inicial del colorante; t_{eq} = tiempo de equilibrio.

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

Materiales derivados de biomasa

Los subproductos agrícolas pueden modificarse o funcionalizarse para producir adsorbentes derivados de la biomasa con una afinidad mejorada con tartrazina. La modificación química y la activación térmica también pueden aumentar el área superficial y la porosidad y alterar la química superficial para introducir grupos funcionales que mejoran la adsorción de colorantes.

Los estudios que investigan adsorbentes a base de carbono derivados de biomasa para la eliminación de tartrazina indican que ofrecen altas capacidades de adsorción y mejores características de regeneración que sus equivalentes no modificados (6). Debido a que dependen de precursores económicos, ricos en carbono y con un contenido inorgánico relativamente bajo, los residuos agrícolas son materias primas adecuadas para la producción de AC y biochar, que son los materiales más ampliamente estudiados en esta categoría (20). Generalmente, la biomasa se pretrata mediante secado y molienda, seguido de activación química antes de la carbonización a temperaturas elevadas, generalmente por debajo de 1.073 K, bajo una atmósfera inerte (21,22,24). El material carbonacoso resultante puede utilizarse directamente o activarse física o químicamente para mejorar el rendimiento de adsorción (20).

La figura 3 muestra un esquema de un procedimiento típico para preparar CA a partir de precursores bio-basados, y la Tabla 2 resume los materiales representativos derivados de biomasa modificada utilizados en la remediación con tartrazina. Una combinación de materias primas con características adecuadas y procesos de preparación adecuados conduce a la formación de carbonos con propiedades texturales favorables para la eliminación de tartrazina (19,20,23).

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

Tabla 2. Condiciones de preparación y rendimiento de adsorción de ACs derivados de biomasa y biochar para la eliminación de tartrazina

Materia prima	Pirólisis T (K)	Tiempo de activación (mín)	Agente activador	Área superficial del BET ($m^2\ g^{-1}$)	Qmax (mg g^{-1})	pHOpt	pHPZC	Referencia
Hierba caimán (Alternanthera philoxeroides)	873	120	H2SO4	303	183	2	6.10	(24)
Lantana camara weed	873	120	H2SO4	268	91	2	6.40	(25)
Cáscaras de nuez pecana (Carya illinoinensis)	873	NR	Vapor	5	5	7	9.00	(26)
Cáscaras de nuez pecana (Carya illinoinensis)	1130	NR	Vapor	446	14	7	10.50	(26)
Albaricoque Stonesa	973	180	H3PO4	774	76	6.80	NR	(27)
Mazorca de maíz	673	60	Trietilenetetramina	7	3	2	NR	(28)
Estaba persiguiendo un asiento	823	60	H3PO4	NR	21	1	NR	(29)
Palla de trigo	873	60	Nanopartículas ZrFe2O5	NR	89	2	NR	(30)
Biocarbón comercial	NA	NA	NA	67.20	3.28	2	6.50	(31)

NR = no reportado; NA = no aplicable; T = temperatura; BET = Brunauer-Emmett-Teller; Q_{max} = capacidad máxima de adsorción; [a] = estudio de adsorción con lecho fijo.

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

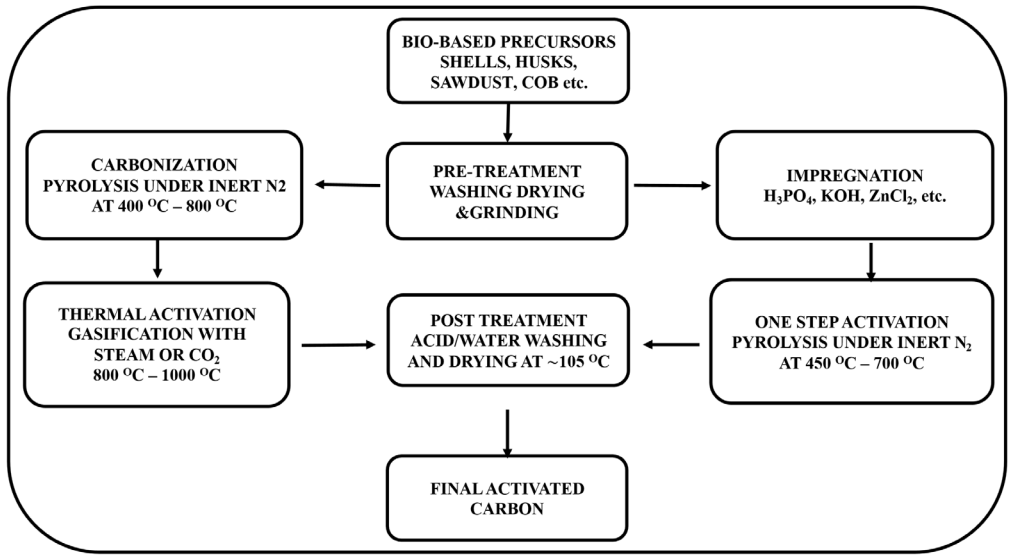


Figura 3. Preparación de AC a partir de precursores bio-basados (**Fuente:** Autores).

La literatura sobre carbonos derivados de biomasa para tartrazina, presentada en la Tabla 2, muestra diferencias de rendimiento impulsadas por la elección del agente activador, la historia del procesamiento térmico y la electrocinética de la solución. Temperaturas de pirólisis más altas (973-1.130 K) produjeron carbonos con áreas superficiales mayores (26,27). Esto es comprensible, ya que una temperatura y un tiempo de activación más altos generalmente mejoran el desarrollo de los poros (20). Sin embargo, una mayor superficie no se asoció de forma consistente con una mayor capacidad de adsorción de tartrazina, lo que significa que la adsorción de tartrazina no depende únicamente de las propiedades superficiales de los adsorbentes. Por ejemplo, el CA producido a temperaturas más altas (1130 y 973 K) con superficies BET de 774 y 446 m2 g^{-1} tenía capacidades de adsorción de 76 y 14 mg g^{-1}, respectivamente. Los AC con superficies BET de 268 y 303 m2 g-1 exhibieron capacidades de adsorción mayores de 91 y 183 mg g-1, respectivamente.

La adsorción de tartrazina se ve afectada por el método de activación y la duración. La activación química con H2SO4 y H3PO4 a duraciones más largas (120-180 min) condujo a una mayor capacidad de adsorción (76-303 m2 g^{-1}), mientras que la activación con H3PO4 a 60 min produjo adsorbentes con una capacidad de adsorción de 21 m2 g^{-1}. Esto se debe a que la activación química con H2SO4 y H3PO4 introduce grupos funcionales ácidos que aumentan la acidez general de la superficie. Esto incrementa la atracción electrostática hacia el tinte aniónico bajo condiciones ácidas, y duraciones más largas también incrementan la densidad de grupos funcionales en la superficie AC (33). Los adsorbentes activados por vapor (Carya illinoinensis Cascas de nuez) exhibió capacidades de adsorción comparativamente bajas, posiblemente porque la activación del vapor aumenta principalmente la porosidad y la superficie pero introduce menos grupos funcionales ácidos de la superficie, limitando así las interacciones electrostáticas.

El pH en el punto de carga cero (pHpzc) es importante para la comprensión Interacciones electrostáticas entre superficies adsorbentes y adsorbatos iónicos. A pH inferior pHpzc, la superficie

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

adsorbente adquiere una carga positiva neta debido a la protonación de grupos funcionales superficiales, favoreciendo la captación de tintes aniónicos como la tartrazina. Por el contrario, a pH superior pHpzc, la superficie se carga negativamente, induciendo repulsión electrostática y reducción de la adsorción (33).

La tabla 2 muestra que los valores de pHpzc varían considerablemente según el material precursor y el método de activación. El biocarbón comercial (pHpzc = 6,5), los carbones activados ácidos de la maleza caimán (pHpzc = 6,1) y Lantana camara pHpzc = 6,4) presentan superficies moderadamente ácidas. Sin embargo, las cáscaras de nuez (Pecan (Carya illinoinensis) presentan superficies moderadamente básicas.

La relación entre pHpzc y el comportamiento de adsorción está bien demostrado en estudios de eliminación de tartrazina. Para la maleza caimán AC (24), capacidad de adsorción de 183 mg g^{-1} se alcanzó a pH 2, muy por debajo de pHpzc de 6.1, donde la superficie está cargada positivamente y atrae electrostáticamente los grupos sulfonato aniónico de la tartrazina (24). De manera similar, para Lantana camara AC y el biocarbón comercial (pHpzc = 6,4 y 6,5, respectivamente), los valores óptimos de pH están muy por debajo de pHpzc, consistente con la protonación de grupos funcionales superficiales y la atracción electrostática. La capacidad de adsorción para ambos (Carya illinoinensis) cáscaras de nuez preparadas a diferentes temperaturas son mucho más bajos (5 y 14 mg g^{-1}) que el de Lantana camara a medida que el pH aumentaba por encima de pHpzc, consistente con la desprotonación de grupos funcionales superficiales y la repulsión electrostática.

Estos resultados demuestran que los carbonos basados en biomasa son adsorbentes de alto rendimiento procedentes de recursos renovables, pero su producción plantea preocupaciones sobre la sostenibilidad. Su ventaja medioambiental proviene principalmente del uso de biomasa residual renovable más que del proceso de preparación en sí, que a menudo conlleva cargas considerables durante el ciclo de vida. Dado que procesos como la carbonización a alta temperatura y la activación química mediante ácidos fuertes, bases o sales reducen significativamente los beneficios ambientales netos mediante el alto consumo energético y la contaminación química secundaria, la sostenibilidad general de estos materiales se evalúa junto con la demanda energética de la carbonización, el uso de agentes activantes, el consumo químico y el potencial de regeneración y reutilización de adsorbentes. Esto es especialmente importante dado que algunos residuos agrícolas no modificados superaron a algunos adsorbentes de corriente alterna (Tablas 1 y 2). Por ello, considerar el rendimiento de adsorción junto con los requisitos de producción es necesario al evaluar los méritos prácticos y medioambientales, y se requiere una evaluación exhaustiva del ciclo de vida para determinar si la capacidad mejorada supera los costes ambientales.

Polímeros naturales

Polímeros naturales como quitosano y alginato también se han utilizado como adsorbentes eficientes y ecológicos para eliminar la tartrazina. Grupos funcionales como hidroxilo y grupos amino a lo largo de sus cadenas poliméricas contribuyen a su biodegradabilidad y otras propiedades ambientalmente favorables (34). Aunque estos materiales se derivan de recursos biológicos, por ejemplo, la quitina se obtiene de residuos de procesamiento de crustáceos y el

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

alginato se extrae de algas marrones, se diferencian de los adsorbentes de biomasa cruda porque son biopolímeros aislados con estructuras químicas relativamente bien definidas. Este mayor nivel de purificación permite una modificación química controlada mediante reticulación, injerto o funcionalización. Permite adaptar sus propiedades de adsorción de forma más metódica de lo que es posible con residuos agrícolas heterogéneos. Por esta razón, esta revisión trata los polímeros naturales por separado, manteniéndolos dentro de la categoría más amplia de adsorbentes bio-baseados. Dependiendo de su origen biológico, estos polímeros pueden derivar de animales, hongos, algas o plantas (35,36). Las secciones siguientes examinan estos polímeros naturales y sus aplicaciones en la adsorción de tartrazina.

Quitina y quitosano

La quitina es un polisacárido lineal compuesto principalmente por b-(1→4) unidades enlazadas de N-acetil-D-glucosamina, y se reconoce como el biopolímero natural con nitrógeno más abundante después de la celulosa (37). Es un componente estructural importante de las paredes celulares de hongos como los hongos comestibles, Aspergillus spp., y Penicillium Spp. (35). También se encuentra en los exoesqueletos de artrópodos y crustáceos (Figura 4).

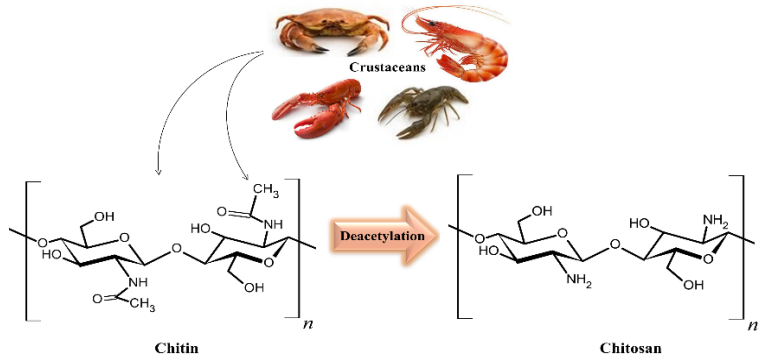


Figura 4. Fuentes de quitina y la estructura de la quitina y el quitosano (**Fuente:** Autores).

La quitina y el quitosano comparten una columna vertebral de polisacáridos ligada a □(1□4) con similitudes estructurales con la celulosa. La principal diferencia es que la quitina sustituye el grupo hidroxilo en la posición C-2 de la celulosa por un grupo acetamido (-NHCOCH3) (Figuras 4 y 5), que, tras la desacetilación, se convierte en un grupo amino (-NH2) en el quitosano. El grado de desacetilación determina la densidad de los grupos amino libres y, en consecuencia, la capacidad de adsorción.

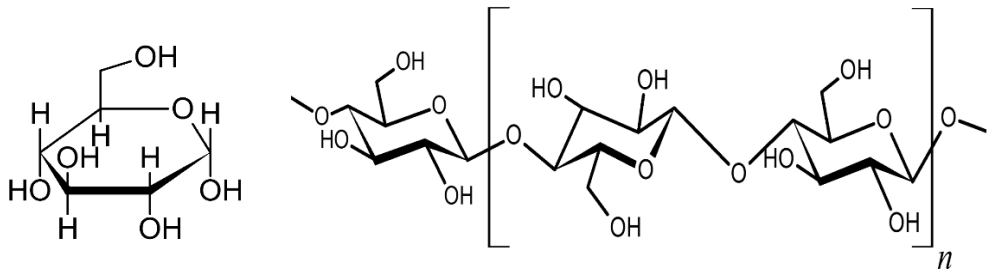


Figura 5. Estructura de (a) glucosa y (b) celulosa (**Fuente:** Autores).

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

Según los datos mostrados en la Tabla 3, los materiales basados en quitina y quitosano son adsorbentes sostenibles prometedores para la eliminación de tartrazina. La mejora de la eficacia del quitosano en comparación con la quitina se debe principalmente a la presencia y densidad de grupos amino capaces de protonar bajo condiciones ácidas, lo que da lugar a una mayor atracción iónica del quitosano hacia la tartrazina.

Tabla 3. Resumen de adsorbentes a base de polímeros naturales para la eliminación de tartrazina de soluciones acuosas.

Polímero base	Forma adsorbente	Co (mg $^{L-1}$)	Qmax (mg $^{g-1}$)	pHOpt	TOpt (K)	Isotermia	Cinética	Ciclo de regeneración	Ref
Quitosanos/ nanotubos de carbono	Películas	NR	660	2	318	Amistoso	PSO	4	(38)
Nanocompuestos de TiO2-quitosano	Membranas	10	83	Gratis	NR	NR	NR	4	(39)
Quitosano-bentonita	Cuenta	60	294.10	2.50	320 K	Langmuir	PSO	NR	(40)
Chitosan-Arthrospira spirulina sp.	Películas	100	110	4	298	NR	NR	NR	(41)
Compuesto de quitosano/ polianilina	Polvo	100	584	7.20	298	Amistoso	PSO	4	(42)
Chitosan	Polvo	100	1066	3	328	NR	NR	NR	(8)
Chitosan	Sanda recubierta de quitosano	90b	595	3	298	NR	Thomas y Yoon-Nelson	NR	(43)
Chitosan	Sanda recubierta de quitosano	90 ^{c} 30 ^{c}	497	3	298	NR	Thomas y Yoon-Nelson	NR	
Chitosan	Sanda recubierta de quitosano	89 ^{d} 17 ^{d}	191	3	298	NR	Thomas y Yoon-Nelson	NR	

^{a} = estudio de adsorción de lecho fijo; ^{b} = sistema único; ^{c} = sistema binario (90 mgL-1 de tartrazina + 20 $^{mgL-1}$ de SY); ^{d} = efluente real (89 $^{mgL-1}$ de tartrazina + 17 mgL-1 de SY); NR = no reportado; PSO = pseudo-segundo orden; SY = amarillo del atardecer; C_0 = concentración inicial del colorante

Un avance cuantitativo clave en el campo es el estudio de Zhang et al. (8). Utilizando quitosano preparado a partir de desechos de camarón rosado con un grado de desacetilación del 85 ± 1 %, los autores informaron de valores de adsorción de tartrazina excepcionalmente altos que oscilaban

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

entre 611,27 y 1065,55 mg g^{-1}. Estos valores son considerablemente superiores a los de muchos AC convencionales y demuestran la fuerte afinidad del quitosano protonado por la tartrazina. El proceso de adsorción se interpretó utilizando un modelo de física estadística multicapa en lugar de ecuaciones tradicionales de Langmuir o Freundlich únicamente, y el análisis sugirió una orientación horizontal de las moléculas de tinte sobre la superficie de quitosano y la formación de múltiples capas a concentraciones más altas. El análisis termodinámico del proceso de adsorción indicó un comportamiento de fisisorción exotérmico dominado por fuerzas de van der Waals y atracciones electrostáticas.

Los beneficios de combinar quitosano con materiales nanoestructurados también se aprecian en estudios que emplean nanopartículas inorgánicas y nanomateriales de carbono. Por ejemplo, películas compuestas obtenidas de quitosano/nanotubos de carbono a 0,1, 0,3 y 0,5% p/w^{-1} fueron investigadas por Lessa et al. (38). La capacidad máxima de adsorción de tartrazina es de 660 mg g^{-1} se logró con el compuesto con nanotubos al 0,1%. El compuesto mantuvo el rendimiento de adsorción durante cuatro ciclos de regeneración antes de una reducción del 5%. La isoterma de adsorción se ajustó a la isoterma de Freundlich, mientras que la cinética se describió mejor mediante el modelo pseudo-de segundo orden. Esto mejoró las características superficiales de la matriz quitosana, aumentó la capacidad de adsorción del quitosano prístino y aumentó la disponibilidad de sitios activos de adsorción. De manera similar, Zioui et al (39) produjo membranas nanocomposiciones fotocatalíticas de TiO2-quitosano que demostraron la exitosa eliminación de tartrazina con una capacidad de adsorción de 83 mg g^{-1} bajo condiciones de pH libre y que también mantuvo su funcionalidad durante cuatro ciclos de regeneración. La capacidad de adsorción de la membrana modificada con TiO2 era menor que la de los sistemas reforzados con nanotubos de carbono, pero incorporar nanopartículas fotocatalíticas de TiO2 mejoró la estabilidad térmica de la membrana, redujo el ángulo de contacto del quitosano prístino de 71 a 46º y proporcionó sitios adicionales de interacción superficial. Estos resultados muestran que incorporar nanopartículas puede modificar el comportamiento de adsorción de las matrices de quitosano al mejorar la estabilidad estructural y la reutilización, lo que, a su vez, incrementa la capacidad de adsorción.

Otra tendencia importante en la literatura revisada es el uso creciente de materiales compuestos para superar las limitaciones del quitosano prístino, como se señaló anteriormente. En consecuencia, estudios recientes se han centrado en hibridar el quitosano con materiales como sílice y las estructuras metal-orgánicas (MOFs). Con este fin, Abd El-Fattah et al. (44) sintetizó un compuesto quitosano/MOF que demostró un mejor rendimiento de adsorción, atribuido a la alta porosidad y a la química superficial ajustable de los MOFs. De manera similar, Wan Ngah et al. (40) También se demostró que incorporar fases de sílice mejoró la estabilidad del quitosano y el comportamiento de adsorción hacia el tinte tartrazina.

La funcionalización superficial es otra estrategia para mejorar la capacidad de adsorción, como Tan et al. (45) lo hicieron. Aumentaron la densidad de grupos amino protonables modificando el quitosano con polietilenemina. Esta modificación amplificó la atracción electrostática hacia las moléculas aniónicas de tartrazina y mejoró sustancialmente el rendimiento de adsorción. Los resultados confirmaron que la eficiencia de adsorción depende no solo de la densidad de carga

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

superficial, sino también de la accesibilidad de los grupos funcionales, y son consistentes con el mecanismo bien establecido de adsorción de tartrazina, que está impulsado por interacciones iónicas entre grupos sulfonato en la molécula de colorante y grupos amino protonados en el quitosano (Figuras 1 y 4).

En un estudio de Ayala-Gutierrez et al. (46) Investigaron las diferencias morfológicas como otra línea de investigación e informaron que el rendimiento de adsorción varía según la morfología del adsorbente, y que el espesor de la película de quitosano influye fuertemente en la cinética de adsorción. Las películas delgadas facilitaron una transferencia de masa más rápida, mientras que las películas más gruesas aumentaron la capacidad total de adsorción, lo que indica que la eficiencia de adsorción depende no solo de la composición química sino también de la arquitectura estructural.

Recientemente desarrolló un sistema altamente atractivo para el tratamiento continuo de aguas residuales que combina alta porosidad, gran superficie y una mayor durabilidad operativa mejorada por Liu et al. (47). Lo lograron sintetizando aerogeles bio-basados estabilizados con MOF, con propiedades antibioincrustantes.

Alginato

El alginato es un biopolímero eficaz y respetuoso con el medio ambiente para eliminar tartrazina de sistemas acuosos. La columna vertebral del biopolímero está formada por unidades de ácido -D-manurónico y ácido -gulurónico, que transportan grupos carboxilo e hidroxilo (Figura 6). Porque el ácido algínico puro es soluble en agua, y el Na-alginato forma geles en solución $\beta \propto$ (48), frecuentemente se entrecruza con iones calcio. El Ca2+ divalente coordina con bloques de guluronato para formar redes tridimensionales de hidrogel tipo “caja de huevos” para mejorar su resistencia mecánica (49,50). Más allá de conferir estabilidad estructural y prevenir la disolución prematura, los iones calcio ligados actúan como puentes iónicos. Estos centros metálicos cargados positivamente protegen parcialmente la carga de fondo negativa de la matriz polimérica e interactúan directamente con los aniones sulfonato de tartrazina mediante coordinación electrostática (51).

Integrar materiales funcionales o compuestos fotocatalíticos aumenta aún más los sitios de adsorción accesibles y la eficiencia en la eliminación de colorantes.

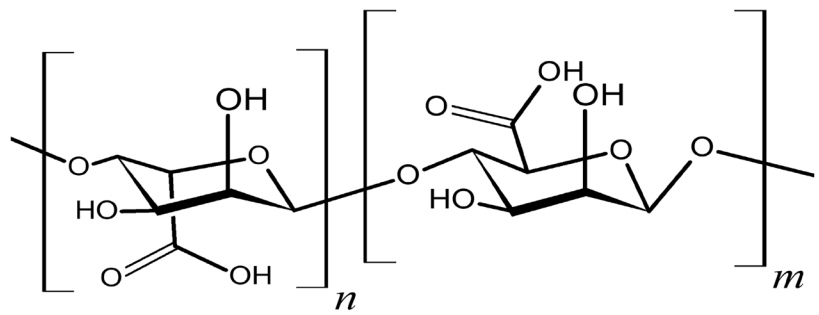


Figura 6. Estructura química del alginato (**Fuente:** Autores).

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

Un ejemplo es la inmovilización de biomasa de Spirulina platensis en perlas de alginato de calcio (Alg-SP). Saloglu y Sahin (52) sintetizó perlas compuestas con cargas de biomasa variables y demostró que incorporar un 3% (p/v) de espirulina mejoraba la adsorción de tartrazina en comparación con el alginato solo.

El rendimiento mejorado del compuesto se atribuyó a los grupos amino, fosfato, sulfato, hidroxilo y carboxilo en la biomasa microalgal, que proporcionaron sitios adicionales de unión para las moléculas de tartrazina. En condiciones óptimas (100 mg de adsorbente, tiempo de contacto de 2 h y carga de biomasa del 3%), las perlas de Alg-SP eliminaron aproximadamente el 98% de la tartrazina de la solución. FTIR, XRD, SEM, TGA y DSC confirmaron la inmovilización exitosa de la espirulina dentro de la matriz de alginato. Al mismo tiempo, el SEM también reveló que la inmovilización producía una morfología superficial más rugosa y homogénea que favorecía la adsorción al aumentar los sitios activos de unión.

Otro enfoque prometedor combina la adsorción basada en alginato con la degradación fotocatalítica. Dalponte et al. (53) perlas compuestas flotantes de TiO2-organobentonita/ alginato de calcio (TiO2-NaOB/CaAlg) sintetizadas mediante gelación ionotrópica. En este material multifuncional, el alginato actuaba como matriz de inmovilización, la organobentonita aumentaba la superficie y la capacidad de adsorción, y el TiO_2 las nanopartículas proporcionaron actividad fotocatalítica. FTIR, BET, SEM y EDS confirmaron la incorporación exitosa de todos los componentes, dando lugar a perlas mesoporosas con un pH_{PZC} de aproximadamente 6,4, lo que las hace aptas para adsorbear tartrazina aniónica bajo condiciones ácidas. La adsorción por sí sola eliminó aproximadamente el 23,5% de tartrazina, y el proceso combinado de adsorción y fotocatálisis logró una eliminación del 95% del tinte en 180 minutos. Las perlas también mantuvieron una eliminación de más del 80% de tartrazina tras siete ciclos de reutilización, demostrando buena estabilidad y las ventajas de los compuestos de alginato que integran la adsorción con procesos avanzados de oxidación.

Polímeros naturales de origen vegetal

Se han utilizado polímeros naturales de origen vegetal como la celulosa, el almidón y sus derivados para remediar aguas residuales contaminadas por tartrazina. Sin embargo, esta aplicación es relativamente nueva en comparación con el uso de residuos agrícolas crudos tratados y sin tratar. Como el material orgánico renovable más abundante del planeta, la celulosa en sus diversas formas se ha utilizado para numerosas aplicaciones de remediación con tintes acuosos.

La mayoría de los materiales biosorbentes obtienen su capacidad de sorción de componentes celulósicos en plantas y microbios, las principales fuentes de celulosa. Esta sección, sin embargo, se centra en los polímeros naturales de origen vegetal y sus derivados modificados para remediar soluciones acuosas contaminadas con tartrazina. Aunque los biopolímeros de origen vegetal en su estado natural están comprobados como adsorbentes ecológicos para la remediación de aguas residuales (54), la modificación aumenta su capacidad de adsorción. Por ejemplo, la cuaternización de la celulosa de trigo por Villabona-Ortíz et al. (55) El uso de cloruro cetiltrimetilamonio (CTAC) provocó un aumento de más del 88% en la capacidad de adsorción del derivado cuaternizado

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

(13,3 mg g^{-1}), en relación con la celulosa pulcra (1,49 mg g^{-1}) obtenidos de residuos de trigo. También encontraron que la muestra modificada alcanzó el equilibrio más rápido (120 min) que su contraparte natural (480 min), pero esto se compensó ampliamente por la mejora en la capacidad de adsorción del adsorbente cuaternizado. Aunque no estudiaron los mecanismos de transferencia de masa, atribuyeron los resultados a un aumento de la protonación de la superficie adsorbente debido a la modificación CTAC.

De manera similar, Dai et al. (56) Se investigó la eliminación de tartrazina de soluciones acuosas utilizando perlas de hidrogel derivadas de almidón de maíz, almidón oxidado y un compuesto de almidón oxidado de maíz entrecruzado con gelatina. El estudio comparó las capacidades de eliminación de estos adsorbentes a base de almidón para la remediación con tartrazina en ambientes acuosos y encontró que los adsorbentes exhibían porosidad uniforme y formaban estructuras de base Schiff estables y compatibles en soluciones electrolíticas. Se varió la concentración de gelatina y se investigó su efecto sobre la capacidad máxima de absorción de tartrazina. La capacidad máxima de adsorción (165 mg g^{-1}) se observó en una proporción de 5:5 (gelatina:almidón). Sin embargo, debido a que los hidrogeles tienen una alta capacidad de absorción de agua, la reciclabilidad del adsorbente se redujo debido a la disolución parcial en medios acuosos con largos tiempos de residencia (más de 18 horas). Por ello, los investigadores suelen modificar los biopolímeros mediante reticulación o funcionalización para mejorar la tasa de adsorción, aumentar la capacidad de absorción, potenciar la selectividad de la tartrazina en presencia de otros colorantes y promover la reciclabilidad.

La nanoesponja de celulosa modificada con cloruro de metiltrioctilamonio fue desarrollada por Shiralipour y Larki (57). La utilizaron para preconcentrar y eliminar tartrazina de medios acuosos. Según la isoterma BET, que mejor se ajustaba a los datos de adsorción, la capacidad máxima de adsorción de las nanoesponjas fue de 180 mg g^{-1} de adsorbente, utilizando 0,005 g de adsorbente.

Chen et al. ha reportado un método sencillo para producir un adsorbente poroso rico en aminas con mejor reciclabilidad para la descontaminación de colorantes aniónicos. (58). Prepararon el adsorbente entrecruzando glucosa y dietilenetriamina con cloropropano epoxi y probaron su eficacia utilizando amaranto y tartrazina. Sus resultados mostraron que la adsorción alcanzó el equilibrio en 20 minutos, con una capacidad máxima de adsorción de 534,76 mg g^{-1} para tartrazina. Además de su capacidad de adsorción relativamente alta, el bioabsorbente mostró una alta selectividad para tartrazina, como demuestra su capacidad para adsorber selectivamente tartrazina a partir de una solución de tartrazina y amaranto, una propiedad necesaria para aplicaciones reales ya que los efluentes industriales siempre están compuestos por varios colorantes. Sus resultados también mostraron que el adsorbente podía reciclarse durante hasta cinco ciclos consecutivos de adsorción y desorción manteniendo un alto porcentaje de eliminación de tartrazina (78,90%), lo que lo convierte en un material viable para la remediación ambiental de corrientes residuales contaminadas por tartrazina.

Se ha estudiado el polisacárido de goma de melocotonismo cuaternizado y reticulado preparado añadiendo cloruro de gliciditrimetilamonio por su eficiencia de eliminación de tartrazina (59). Un estudio de las propiedades de adsorción del polisacárido natural de la goma de melocotonero y sus derivados modificados reveló que presentan una alta selectividad para la tartrazina, son

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

espontáneos y endotérmicos, y siguen una cinética pseudo-de segundo orden. Según la isoterma de Langmuir, la capacidad máxima de adsorción del análogo reticulado se calculó en 814,5 mg g^{-1}, mientras que la capacidad de adsorción aumentó a 1136,7 mg g^{-1} para la derivada cuaternizada. Además de su mayor capacidad de adsorción, el análogo cuaternizado también mostró una tasa de adsorción mayor (tiempo de equilibrio de 10 min), mejor estabilidad ambiental, mayor selectividad de adsorción y eficiencia de regeneración que sus homólogos.

Resumen comparativo de polímeros naturales

La evaluación de la eficacia de los polímeros naturales en la eliminación de tartrazina muestra un orden claro de capacidad de adsorción. Los polímeros vegetales modificados (110-1136 mg g^{-1}) y los materiales a base de quitosano (30-1065 mg g^{-1}) presentan las mayores capacidades. El carbón activado (CA) y el biocarbón (100-183 mg g^{-1}) poseen capacidades de adsorción moderadas a altas, mientras que los residuos agrícolas no modificados (1-91 mg g^{-1}) presentan las menores eficiencias de eliminación.

La diferencia de rendimiento entre la quitina (30 mg g-L) y la quitosano (350-1065 mg g^{-1}) subraya la importancia de la desacetilación, que introduce grupos amino protonables que favorecen la atracción electrostática entre la superficie del polímero cargada positivamente y los grupos sulfonatos de tartrazina. Esta alta eficiencia convierte al quitosano en el polímero natural más ampliamente investigado y eficaz para la captura de tartrazina.

Los polímeros de origen vegetal presentan un potencial de adsorción comparable cuando se modifican adecuadamente, aunque sus mecanismos y funciones varían. Para alcanzar capacidades competitivas, a menudo son necesarias modificaciones químicas como la cuaternización o el reticulamiento, que pueden aumentar la complejidad y el impacto ambiental. Aunque el alginato por sí solo tiene una capacidad limitada, su compatibilidad con matrices compuestas lo convierte en una columna vertebral ideal para el desarrollo de materiales compuestos.

Aunque la capacidad de adsorción por sí sola no determina la idoneidad práctica, las capacidades máximas de adsorción reportadas para polímeros modificados de origen vegetal han alcanzado valores comparables y, en algunos casos, superiores a los de varios sistemas basados en quitosano. Por ejemplo, el polisacárido cuaternizado de goma de melocotón mostró una capacidad de adsorción de Langmuir de 1136,7 mg g^{-1}, mientras que los materiales a base de quitosano han reportado capacidades entre 110 y 1065,55 mg g-1 en condiciones ácidas. El quitosano funciona bien a pH bajo porque la protonación de grupos amino potencia la unión a la tartrazina, mientras que los polímeros vegetales modificados pueden ofrecer una mayor flexibilidad operativa dependiendo de los grupos funcionales introducidos. El comportamiento de regeneración también importa, ya que algunos materiales quitosanos, como el polvo compuesto de quitosano/polianilina investigado por Sahnoun & Boutahala (42), muestran buena reciclabilidad, a diferencia de algunos adsorbentes a base de almidón que se hinchan o disuelven parcialmente durante una exposición acuosa prolongada. Por tanto, la selección entre quitosano y adsorbentes poliméricos de origen vegetal depende no solo de la capacidad de adsorción sino también de la estabilidad estructural, la capacidad de regeneración, los requisitos de preparación y el rendimiento bajo condiciones realistas de aguas residuales.

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

Desafíos y direcciones futuras de la adsorción basada en bio

La revisión de las investigaciones existentes muestra que los adsorbentes de base biológica eliminan eficazmente la tartrazina del agua. Los residuos agrícolas, al ser económicos y fácilmente disponibles, sirven como adsorbentes moderadamente efectivos adecuados para aguas residuales de baja concentración en entornos con recursos limitados. Los carbonos derivados de biomasa, potenciados mediante activación térmica y química, pueden alcanzar mayores capacidades de adsorción pero requieren una producción intensiva en energía. Los polímeros naturales como el quitosano ofrecen las mayores capacidades debido a sus numerosos grupos funcionales, pero requieren purificación y modificación. Aunque los materiales compuestos combinan beneficios, también implican una fabricación más compleja y plantean cuestiones de sostenibilidad.

Los resultados de laboratorio reportados son alentadores, pero la adopción de estos materiales para el tratamiento de aguas residuales industriales presenta varios desafíos. Los principales problemas incluyen un rendimiento inconsistente del adsorbente, inestabilidad mecánica, mala regenerabilidad y falta de métodos de evaluación estandarizados.

Desafíos actuales

1. Variabilidad y reproducibilidad del material

Las propiedades fisicoquímicas de los adsorbentes fabricados a partir de residuos agrícolas varían considerablemente. Esta variación depende de factores como la especie vegetal, el origen geográfico, los métodos de cultivo y las técnicas de procesamiento. En el caso de materiales químicamente activados o tratados térmicamente, el agente activador y las condiciones de preparación influyen en la superficie superficial, la estructura de los poros y la distribución de grupos funcionales. En consecuencia, esta variabilidad conduce a una capacidad de adsorción y un rendimiento cinético inconsistentes entre lotes, y complica el control de calidad y la reproducibilidad en comparación con los adsorbentes tradicionales con composiciones más uniformes.

2. Estabilidad mecánica y manejo

Polímeros naturales como los materiales de hidrogel procedentes del almidón y Hincha o afloja alginato su estructura cuando están en contacto prolongado con el agua (60). Los materiales basados en quitosano pueden sufrir cambios estructurales tras múltiples ciclos de adsorción-desorción, especialmente cuando se regeneran con agentes ácidos o alcalinos (61). Además, procesar residuos agrícolas en partículas finas puede complicar la recuperación de adsorbentes.

3. Lixiviación química

Las investigaciones han demostrado que la lixiviación química de biosorbentes modificados introduce contaminantes secundarios en el agua tratada (64). Los posibles lixiviados incluyen activadores residuales, reticulantes no reaccionados como la gelatina, componentes orgánicos solubles, metales incorporados como el titanio y modificadores. Zioui et al. (39) atribuyó la pérdida del 5% en la eficiencia fotocatalítica del compuesto quitosano-TiO2 al lavado de TiO2 de la superficie del biopolímero quitosano durante su primer uso y su posterior limpieza. Por tanto, la

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

lixiviación debe evaluarse bajo las condiciones de pH de funcionamiento pertinentes y a lo largo de ciclos repetidos de adsorción y regeneración. Un lavado exhaustivo por sí solo no establece la seguridad, por lo que deben analizarse las sustancias liberadas y, cuando proceda, deben realizarse pruebas de toxicidad.

4. Regeneración y reutilización

La tartrazina es un tinte aniónico altamente soluble en agua. Cuando se reporta regeneración, las eficiencias suelen disminuir tras 2-7 ciclos. La tartrazina se une fuertemente a adsorbentes como las arenas recubiertas de quitosano, por lo que rara vez se logra una regeneración completa. Los intentos de desorbar tartrazina utilizando 0,1 M de H2SO4, EDTA y NaOH produjeron menos del 30 % de recuperación (40). Así, la regeneración a partir de superficies adsorbentes suele requerir eluentes fuertes como NaOH o HCl, que pueden degradar la funcionalidad de la superficie adsorbente, reducir el número de sitios de adsorción accesibles, favorecer la lixiviación de componentes orgánicos (para biomasa no modificada) y generar flujos secundarios de residuos, haciendo incierta la estabilidad a largo plazo de los adsorbentes bio-baseados en condiciones de operación industrial.

Por tanto, la gestión al final de su vida debe abordar tanto los biosorbentes agotados como las soluciones de regeneración que contienen tintes, ya que la aplicación directa en tierra o el compostaje no son seguros porque los tintes adsorbidos, modificadores, reticuladores o sus productos de transformación pueden permanecer móviles o tóxicos (62).

5. Falta de evaluación estandarizada

Las variaciones en las condiciones experimentales y en los métodos de reporte complican las comparaciones entre estudios. Algunos estudios informan porcentajes de eliminación basados en la concentración, mientras que otros se centran en la capacidad adsorbente. La elección de modelos isotermios y cinéticos también difiere. Factores como el pH, la temperatura y la concentración inicial varían ampliamente, y el rendimiento en la regeneración frecuentemente no se informa o carece de detalle.

6. Brechas de conocimiento en la literatura

Existen varias lagunas en la literatura actual.

Los efluentes industriales contienen tintes, sales, tensioactivos y compuestos orgánicos que pueden competir por sitios de adsorción o alterar las interacciones superficiales. Las sales disueltas bloquean la atracción electrostática entre la tartrazina aniónica y las superficies adsorbentes cargadas positivamente, mientras que los aniones competidores pueden reducir la disponibilidad de sitios de adsorción (63). Sin embargo, los efectos de la sal dependen de la química del adsorbente y de la solución. Entre los estudios revisados, solo se ha probado arena recubierta de quitosano con efluente real (43), logrando una Q_{Max} de 237 mg g^{-1}. Esto es significativamente inferior a las capacidades observadas en sistemas individuales (595 mg g^{-1}) y sistemas binarios (497 mg g^{-1}). A la luz de estas diferencias, la prueba matricial realista es importante. Sin embargo, no aísla la

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

interferencia salina, por lo que es necesaria una evaluación sistemática de las composiciones representativas de las sales y de las concentraciones iónicas para distinguir los efectos de la sal de otras interacciones matriciales.

Los estudios de laboratorio emplean principalmente la adsorción por lotes, y los estudios de lecho fijo y de lecho fluidizado, que son esenciales para la ampliación de la escala, se limitan a unos pocos informes (27,43). Por ello, es necesario realizar pruebas de flujo continuo utilizando efluentes reales para validar el rendimiento en condiciones industriales.

Muchos estudios no reportan datos de regeneración. Cuando se reportan, el número de ciclos es limitado (2-7), y rara vez se aborda el efecto de los eluentes de regeneración sobre la integridad estructural del adsorbente.

Existen análisis tecnoeconómicos exhaustivos limitados para adsorbentes de tartrazina bio-base. Los costes de producción, la logística de las materias primas, la vida útil del adsorbente y los costes de eliminación de residuos no se evalúan sistemáticamente. Esto limita las comparaciones entre adsorbentes de base biológica y alternativas comerciales.

Perspectivas futuras de la adsorción basada en bio

A pesar de estos desafíos, el campo está evolucionando rápidamente, con varias direcciones prometedoras que podrían redefinir el papel de la adsorción basada en bio en el tratamiento de aguas residuales.

1. Sistemas de flujo continuo

Pocos estudios han explorado la eliminación de tartrazina en sistemas de lecho fijo o de lecho fluidizado. La investigación futura debería centrarse en la modelización de curvas de ruptura para entender cómo se comporta dinámicamente la adsorción bajo flujo, analizar la transferencia de masa para identificar pasos limitadores de velocidad como la difusión de la película, la difusión intrapartícula y las reacciones superficiales, desarrollar protocolos de regeneración en columna para una regeneración in situ eficiente y realizar pruebas piloto utilizando efluentes industriales reales.

2. Validación real de aguas residuales

Los estudios de soluciones de colorante único son esenciales, pero no suficientes. La investigación futura debería explorar cómo la tartrazina compite por la adsorción cuando hay otros tintes y componentes característicos de aguas residuales, como sales y materia orgánica natural, presentes, ya que la fuerza iónica puede afectar las interacciones electrostáticas. Además, la competencia de materia orgánica disuelta por los sitios de adsorción podría disminuir la eficacia del adsorbente.

3. Vías de conversión de residuos en energía

Los adsorbentes usados no regenerables requieren una gestión adecuada. Las estrategias eficaces incluyen convertir biomasa gastada en biocarbón mediante carbonización, incinerar adsorbentes cargados con colorantes para recuperar energía, utilizar adsorbentes usados en aplicaciones catalíticas donde pueden servir como catalizadores para otras reacciones, y su eliminación en vertederos como último recurso. Sin embargo, la regeneración debería minimizar esta necesidad. Cuando la reutilización ya no sea factible, deben emplearse opciones como el tratamiento térmico

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

controlado con controles de emisiones adecuados o la eliminación estabilizada, sujetas a la caracterización de residuos y a la normativa aplicable.

4. Evaluación Tecnoeconómica y del Ciclo de Vida

La investigación futura debería ir más allá de la mera medición de la capacidad de adsorción. También debería evaluar los costes de producción, desde la adquisición de materias primas, transporte, procesamiento, activación, hasta la eliminación de residuos, junto con el consumo de energía durante el secado, molienda, carbonización y regeneración. Además, las evaluaciones deberían considerar impactos ambientales como el potencial de calentamiento global, el consumo de agua y la ecotoxicidad, así como un análisis coste-beneficio que compare estos materiales con el aire acondicionado comercial basado en capacidad por unidad de coste.

Conclusión

La búsqueda de métodos de remediación efectivos y sostenibles para las aguas residuales contaminadas con tartrazina está impulsada por preocupaciones sobre sus efectos en la salud humana y los ecosistemas. Esta revisión presenta la adsorción basada en bio como una opción viable para eliminar tartrazina, ya que los materiales biológicos son abundantes y estructuralmente variados. Los residuos agrícolas, los carbonos derivados de biomasa y los polímeros naturales han demostrado la capacidad de extraer tartrazina del agua. No obstante, su efectividad varía según la fuente del material, la química superficial, las técnicas de modificación y las condiciones de funcionamiento.

Los polímeros naturales modificados químicamente y los materiales de carbono derivados de biomasa modificados generalmente presentan las mayores capacidades de adsorción entre las clases de adsorbentes. Esto se debe a que incorporan grupos funcionales adicionales que mejoran el acceso a los sitios de adsorción. Sin embargo, estas ventajas implican métodos de preparación más complejos y un mayor uso de productos químicos.

En las categorías de adsorbentes, la atracción electrostática entre sitios de adsorción cargados positivamente y los grupos sulfonato aniónico de la tartrazina es el mecanismo más consistentemente reportado, con enlaces de hidrógeno, difusión porosa e interacciones hidrofóbicas contribuyendo en grados variables dependiendo de la estructura específica del adsorbente. Sin embargo, dado que este mecanismo electrostático predominante depende de una extensa protonación superficial, las altas eficiencias de eliminación se limitan a condiciones fuertemente ácidas (pH 1,5-3,0).

Esta dependencia de un pH operativo bajo impone una limitación práctica. Acidificar el efluente industrial requiere una entrada sustancial de productos químicos, y neutralizarlo antes del vertido aumenta el consumo químico, aumenta los costes y corre el riesgo de corrosión del equipo y de salinización de las aguas receptoras. En consecuencia, a menos que los adsorbentes estén específicamente diseñados para mantener cargas superficiales positivas o altas capacidades de adsorción alrededor del pH neutro, o estén integrados en sistemas de circuito cerrado totalmente regenerables, los beneficios medioambientales de estos tratamientos son limitados para aplicaciones a gran escala.

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

Aunque los resultados de laboratorio son prometedores, el principal obstáculo para ampliar la escala no es la escasez de adsorbentes de alta capacidad, sino la ausencia de pruebas y validación estandarizadas bajo condiciones realistas de aguas residuales. Las variaciones en fuentes precursoras, métodos de preparación, ajustes de adsorción y prácticas de reporte dificultan una comparación significativa de los estudios. La investigación futura debería centrarse en desarrollar adsorbentes bio-baseados mecánicamente estables y regenerables; realizar pruebas de flujo continuo con efluentes reales; mejorar la comprensión mecanicista; y evaluar a fondo los impactos ambientales y económicos.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Ikodiya Orji. Curación de datos: Ikodiya Orji. Análisis formal: EKPO, Idongesit Effiong. Metodología: Ikodiya Orji y EKPO, Idongesit Effiong. Validación: Ikodiya Orji y EKPO, Idongesit Effiong. Visualización: EKPO, Idongesit Effiong. Redacción (borrador original): Ikodiya Orji. Redacción (revisión y edición): EKPO, Idongesit Effiong.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no haber conflicto de intereses.

Financiación

Los autores no recibieron financiación de ninguna organización para el trabajo presentado.

Referencias

1. Islam MdM, Aidid AR, Mohshin JN, Mondal H, Ganguli S, Chakraborty AK. A critical review on textile dye-containing wastewater: Ecotoxicity, health risks, and remediation strategies for environmental safety. Cleaner Chemical Engineering, (2025) 11:100165. https://doi.org/10.1016/j.clce.2025.100165
2. Ali MA, Mubarak MF, Keshawy M, Zayed MA, Ataalla M. Adsorption of Tartrazine anionic dye by novel fixed bed Core-Shell- polystyrene Divinylbenzene/Magnetite nanocomposite. Alexandria Engineering Journal, (2022) 61(2),1335-52. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.016
3. Jadhav S, Jaspal D. Adsorptive eradication of tartrazine from aqueous solutions onto doped polyaniline. Journal of the Serbian Chemical Society, (2020) 85(2), 251-63. https://doi.org/10.2298/JSC190705116J
4. Haridevamuthu B, Murugan R, Seenivasan B, Meenatchi R, Pachaiappan R, Almutairi BO, et al. Synthetic azo-dye, Tartrazine induces neurodevelopmental toxicity via mitochondria-mediated apoptosis in zebrafish embryos. Journal of Hazardous Materials, (2024) 461:132524.
5. Khader EH, Mohammed TJ, Albayati TM. Comparative performance between rice husk and granular activated carbon for the removal of azo tartrazine dye from aqueous solution. Desalination and Water Treatment, (2021) J229, 372-83. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27374
6. Madeira CSP, Zavarize DG, Vieira GEG. Optimized adsorption onto biosolids-based activated carbon for tartrazine removal from wastewater. Water Environment Research, (2019 91(5),

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

417-27. https://doi.org/10.1002/wer.1039

7. Ansari R, Banimahd Keivani M, Fallah Delavar A. Application of polyaniline nanolayer composite for removal of tartrazine dye from aqueous solutions. Journal of Polymer Research, (2011) 18(6),1931–9. https://doi.org/10.1007/s10965-011-9600-z
8. Zhang L, Sellaoui L, Franco D, Dotto GL, Bajahzar A, Belmabrouk H, et al. Adsorption of dyes brilliant blue, sunset yellow and tartrazine from aqueous solution on chitosan: Analytical interpretation via multilayer statistical physics model. Chemical Engineering Journal, (2020) 382, 122952. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122952
9. Priem J, Piwowar H, Orr R. OpenAlex: A fully-open index of scholarly works, authors, venues, institutions, and concepts. 26th International Conference on Science and Technology Indicators (STI), Granada, Spain, (2022), Sep 7-9.
10. Blachnio M, Zienkiewicz-Strzalka M, Derylo-Marczewska A. Synthesis of Composite Sorbents with Chitosan and Varied Silica Phases for the Adsorption of Anionic Dyes. Molecules, (2024) 29(9), 2087. https://doi.org/10.3390/molecules29092087
11. Tejada-Tovar C, Villabona-Ortiz Á, Aguilar-Bermúdez F, Pájaro-Moreno Y, González-Delgado ÁD. Evaluation of Adsorbent Biomaterials Based on Coconut Mesocarp for Treatment of Wastewater Contaminated with Tartrazine Dye. Processes, (2023) 11(11), 3115. https://doi.org/10.3390/pr11113115
12. Leulescu M, Rotaru A, Pălărie I, Moanţă A, Cioateră N, Popescu M, et al. Tartrazine: physical, thermal and biophysical properties of the most widely employed synthetic yellow food-colouring azo dye. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (2018) 134(1), 209–31. https://doi.org/10.1007/s10973-018-7663-3
13. Annadurai G, Juang R, Lee D. Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions. Journal of Hazardous Materials, (2002) 92(3), 263–74. https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00017-1
14. Albadarin AB, Charara M, Abu Tarboush BJ, Ahmad MNM, Kurniawan TA, Naushad Mu, et al. Mechanism analysis of tartrazine biosorption onto masau stones; a low cost by-product from semi-arid regions. Journal of Molecular Liquids, (2017) 242, 478–83. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.07.045
15. Dos Santos LN, Porto CE, Bulla MK, Batistela VR, Barros BCB. Peach palm and cassava wastes as biosorbents of tartrazine yellow dye and their application in industrial effluent. Scientia Plena, (2021) 17(5), 1-19. https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.054201
16. Mujtaba G, Hai A, Ul Hassan Shah M, Ullah A, Anwar Y, Shah F, et al. Potential of Capparis decidua plant and eggshell composite adsorbent for effective removal of anionic dyes from aqueous medium. Environmental Research, (2024) 247, 118279. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118279
17. Rêgo TV, Cadaval TRS, Dotto GL, Pinto LAA. Statistical optimization, interaction analysis and desorption studies for the azo dyes adsorption onto chitosan films. Journal of Colloid and Interface Science, (2013) 411,27-33.

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.08.051

18. Qian W, Hu M, Su Y, Shan S, Zhang Z, Hu L, et al. Insight into mass transfer during adsorption of geniposidic acid onto a fixed-bed column by numerical simulation considering influence of operating conditions on column adsorption performance. Separation and Purification Technology, (2023) 319, 124021. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124021
19. Reck IM, Paixão RM, Bergamasco R, Vieira MF, Vieira AMS. Removal of tartrazine from aqueous solutions using adsorbents based on activated carbon and Moringa oleifera seeds. Journal of Cleaner Production. 2018 Jan;171:85–97. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.237
20. Heo S, Kim W, Jo Y, Adelodun AA. Fabrication of bamboo-based activated carbon for low-level CO_2 adsorption toward sustainable indoor air. Sustainability, (2024) 16(4), 1634. https://doi.org10.3390/su16041634
21. Karimi M, Shirzad M, Silva JA, Rodrigues AE. Biomass/Biochar carbon materials for CO_2 capture and sequestration by cyclic adsorption processes: A review and prospects for future directions. Journal of CO_2 Utilization, (2022) 57, 101890. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.101890
22. Poonam, Rani A & Sharma PK. Biosorption: Principles, and Applications. In: Gupta LM, Ray MR, Labhasetwar PK (editors). Advances in Civil Engineering and Infrastructural Development, (2021) 87, 501–10. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6463-5_48
23. Xu C & Strømme M. Sustainable porous carbon materials derived from wood-based biopolymers for CO_2 capture. Nanomaterials, (2019) 9(1), 103. https://doi.org/10.3390/nano9010103
24. Gautam PK, Gautam RK, Banerjee S, Lofrano G, Sanroman MA, Chattopadhyaya MC, et al. Preparation of activated carbon from Alligator weed (Alternenthera philoxeroids) and its application for tartrazine removal: Isotherm, kinetics and spectroscopic analysis. Journal of Environmental Chemical Engineering, (2015) 3(4), 2560–2568. https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.08.004
25. Gautam RK, Gautam PK, Banerjee S, Rawat V, Soni S, Sharma SK, et al. Removal of tartrazine by activated carbon biosorbents of Lantana camara: Kinetics, equilibrium modeling and spectroscopic analysis. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015 3(1), 79–88. https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.11.026
26. Torres-Pérez J, Soria-Serna LA, Solache-Ríos M, McKay G. One Step Carbonization/Activation Process for Carbonaceous Material Preparation from Pecan Shells for Tartrazine Removal and Regeneration after Saturation. Adsorption Science & Technology, 2015 33(10), 895–913. https://doi.org/10.1260/0263-6174.33.10.895
27. Albroomi HI, Elsayed MA, Baraka A, Abdelmaged MA. Batch and fixed-bed adsorption of tartrazine azo-dye onto activated carbon prepared from apricot stones. Applied Water Science, (2017) 7(4), 2063–74.

https://doi.org/10.1007/s13201-016-0387-2

28. Mahmoud ME, Abdelfattah AM, Tharwat RM, Nabil GM. Adsorption of negatively charged food tartrazine and sunset yellow dyes onto positively charged triethylenetetramine biochar: Optimization, kinetics and thermodynamic study. Journal of Molecular Liquids, (2020) 318, 114297. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114297
29. Chukwuemeka-Okorie HO, Ekuma FK, Akpomie KG, Nnaji JC, Okereafor AG. Adsorption of tartrazine and sunset yellow anionic dyes onto activated carbon derived from cassava sievate biomass. Applied Water Science, (2021) 11(2), 27. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01357-w
30. Perveen S, Nadeem R, Nosheen F, Asjad MI, Awrejcewicz J, Anwar T. Biochar-Mediated Zirconium Ferrite Nanocomposites for Tartrazine Dye Removal from Textile Wastewater. Nanomaterials, (2022) 12(16), 2828. https://doi.org/10.3390/nano12162828
31. Soran ML, Bocșa M, Pintea S, Stegarescu A, Lung I, Opriş O. Commercially Biochar Applied for Tartrazine Removal from Aqueous Solutions. Applied Sciences, (2023) 14(1), 53. https://doi.org/10.3390/app14010053
32. Liu W, Wu F, Fan M, Zhang S, Wang S, Hu X. Activation of poplar with H_3PO_4 and H_2SO_4: Synergistic effects of dual acids on pore development of activated carbon for enhanced adsorption of phenol and tetracycline. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, (2025) 138861. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138861
33. Akl MA, Serage AA. Chitosan impregnated sugarcane bagasse biochar for removal of anionic dyes from wastewater. Scientific Reports, (2024) 14(1), 27097. https://doi.org/10.1038/s41598-024-77708-9
34. Salehi M, Rashidinejad A. Multifaceted roles of plant-derived bioactive polysaccharides: A review of their biological functions, delivery, bioavailability, and applications within the food and pharmaceutical sectors. International Journal of Biological Macromolecules, (2025) 290, 138855. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138855
35. Benalaya I, Alves G, Lopes J, Silva LR. A Review of Natural Polysaccharides: Sources, Characteristics, Properties, Food, and Pharmaceutical Applications. International Journal of Molecular Sciences, (2024) 25, 1322. https://doi.org/10.3390/ijms25021322
36. Wu H, Zhou J, Zhang S, Niu P, Li H, Liu Z, et al. A Comparative Study of Removal of Acid Red 27 by Adsorption on Four Different Chitosan Morphologies. Polymers, (2024) 16(7), 1019. https://doi.org/10.3390/polym16071019
37. Stick RV, Williams SJ. Carbohydrates: the essential molecules of life. 2nd ed. Amsterdam London: Elsevier; 2009.38. Stick RV, Williams SJ. Carbohydrates: the essential molecules of life. 2nd ed. Amsterdam, London: Elsevier; 2009.
38. Lessa EF, Gerhardt R, Arabidian V, da Silva KA, da Silveira Junior N, Jaeschke DP, et al. Synthesis of Chitosan/Carbon Nanotubes Composite Films as Potential Removal of Anionic and Cationic Dyes in Aqueous Solutions. ACS Omega (2025) 10(29), 31840–53.

https://doi.org/10.1021/acsomega.5c03164

39. D. Zioui, L. Aoudjit, F. Touahra, and K. Bachari, Preparation and characterization of TiO_2-chitosan composite films and application for tartrazine dye degradation, Cellulose Chemistry and Technology (2025) 56, . 9-10, 1101–1107, Nov. 2022, https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2022.56.98
40. Wan Ngah WS, Ariff NFM, Hanafiah MAKM. Preparation, Characterization, and Environmental Application of Crosslinked Chitosan-Coated Bentonite for Tartrazine Adsorption from Aqueous Solutions. Water Air Soil Pollut., (2009) 206(1–4), 225–36. https://doi.org/10.1007/s11270-009-0098-5
41. Silva JM, Farias BS, Gründmann DDR, Cadaval TRS, Moura JM, Dotto GL, et al. Development of chitosan/ Spirulina bio-blend films and its biosorption potential for dyes. Journal of Applied Polymer Science, (2017) 134(11), 44580. https://doi.org/10.1002/app.44580
42. Sahnoun S, Boutahala M. Adsorption removal of tartrazine by chitosan/polyaniline composite: Kinetics and equilibrium studies. International Journal of Biological Macromolecules, (2018) 114, 1345–53. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.146
43. Camara AS, Lütke SF, Pinheiro CP, Vieira MLG, Sant'Anna Cadaval TR, De Almeida Pinto LA. Chitosan-coated sand and its application in a fixed-bed column to remove dyes in simple, binary, and real systems. Environmental Science and Pollution Research, (2020) 30, 37938–37945. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09924-5
44. Abd El-Fattah W, Guesmi A, Hamadi NB, Houas A, Alotaibi MT, El-Desouky MG, et al. Novel composite from chitosan and a metal-organic framework for removal of tartrazine dye from aqueous solutions; adsorption isotherm, kinetic, and optimization using Box-Benkhen design. International Journal of Biological Macromolecules, (2024) 273, 133015. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133015
45. Tan J, Kong L, Huang Q, Gan Y, Lu S. Harnessing the power of polyethyleneimine in modifying chitosan surfaces for efficient anion dyes and hexavalent chromium removal. Environmental Research, (2024) 247, 118192. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118192
46. Ayala-Gutierrez D, Zavala-Arce RE, Garcia-Gonzalez A. Evaluation of the effect of chitosan-based film thickness on the adsorption of tartrazine (yellow No. 5). MRS Advances, (2025) 10(6), 789–794. https://doi.org/10.1557/s43580-025-01242-7
47. Liu C, Zhao M, Liu H, Zhang J, Hu Z, Zhang Y, et al. Robust and anti-biofouling bio-based aerogel with Schiff base network stabilized MOFs for efficient removal of tartrazine dye and U(VI) ions. Separation and Purification Technology, (2025) 361, 131277. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131277
48. Nouri S, Emtiazi G, Ulag S, Gunduz O, Calikoglu Koyuncu AC, Roghanian R, et al. Advanced 3D-printed bone scaffolds with sodium alginate/Tri-calcium phosphate/probiotic bacterial hydroxyapatite: Enhanced mechanical and biocompatible properties for bone tissue engineering. Polymer, (2024) 311, 127523.

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132

https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127523
49. Makarova AO, Derkach SR, Khair T, Kazantseva MA, Zuev YF, Zueva OS. Ion-Induced Polysaccharide Gelation: Peculiarities of Alginate Egg-Box Association with Different Divalent Cations. Polymers, (2023) 15(5), 1243. https://doi.org/10.3390/polym15051243
50. Teshima R, Osawa S, Kawano Y, Hanawa T, Kikuchi A, Otsuka H. Physicochemical Properties of Egg-Box-Mediated Hydrogels with Transiently Decreased pH Employing Carbonated Water. ACS Omega, (2023) 8(8), 7800-7807. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07552
51. Mohammadabadi IS, Javanbakht V. Fabrication of dual cross-linked spherical treated waste biomass/alginate adsorbent and its potential for efficient removal of lead ions from aqueous solutions. Industrial Crops and Products, (2021) 168, 113575. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113575
52. Saloglu D, Sahin OI. Removal of azo dyes-tartrazine, carmoisine, and Allura Red – from wastewater using Spirulina biomass-immobilized alginate beads: equilibrium, kinetics, thermodynamics, desorption, and reusability. Desalination and Water Treatment, (2021) 220:431–445. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27010
53. Dalponte DI, Mathias ÁL, Jorge RMM. A new green floating photocatalyst with Brazilian bentonite into TiO2/alginate beads for dye removal. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, (2021) 627, 127159. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127159
54. Fakhri V, Jafari A, Vahed FL, Su CH, Pirouzfar V. Polysaccharides as eco-friendly bio-adsorbents for wastewater remediation: Current state and future perspective. Journal of Water Process Engineering, (2023) 54, 103980. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103980
55. Villabona-Ortíz Á, Figueroa-Lopez KJ, Ortega-Toro R. Kinetics and Adsorption Equilibrium in the Removal of Azo-Anionic Dyes by Modified Cellulose. Sustainability, (2022) 14(6), 3640. https://doi.org/10.3390/su14063640
56. Dai R, Woo MW, Chen H, Dang X, Mansouri S, Shan Z. Hydrogel beads based on oxidized corn starch cross-linked with gelatin for tartrazine adsorption from aqueous environments. Polym Journal, (2017) 49(7), 549–555. https://doi.org/10.1038/pj.2017.14
57. Shiralipour R, Larki A. Pre-concentration and determination of tartrazine dye from aqueous solutions using modified cellulose nanosponges. Ecotoxicology and Environmental Safety, (2017) 135, 123–129. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.09.038
58. Chen Q, Liao J, Zeng S, Zhou L. Facile Fabrication of Porous Adsorbent with Multiple Amine Groups for Efficient and Selective Removal of Amaranth and Tartrazine Dyes from Water. Materials, (2024) 17(10), 2391. https://doi.org/10.3390/ma17102391
59. Yang H, Shi M, Ma W, Ma X, Zhang J, Wu K, et al. Quaternized cross-linked peach gum polysaccharide as an adsorbent for fast and selective removal of anionic dyes from aqueous solution. International Journal of Biological Macromolecules, (2025) 306, 141571.

https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141571
60. Zhao L, Zhou Y, Zhang J, Liang H, Chen X, Tan H. Natural Polymer-Based Hydrogels: From Polymer to Biomedical Applications. Pharmaceutics, (2023) 15(10), 2514. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15102514
61. Wujcicki Ł, Kluczka J. Recovery of Phosphate(V) Ions from Water and Wastewater Using Chitosan-Based Sorbents Modified-A Literature Review. International Journal of Molecular Sciences, (2023) 24(15), 12060. https://doi.org/10.3390/ijms241512060
62. Baskar AV, Bolan N, Hoang SA, Sooriyakumar P, Kumar M, Singh L, et al. Recovery, regeneration and sustainable management of spent adsorbents from wastewater treatment streams: A review. Science of The Total Environment, (2022) 822, 153555. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153555
63. Rápó E, Tonk S. Factors Affecting Synthetic Dye Adsorption; Desorption Studies: A Review of Results from the Last Five Years (2017–2021). Molecules, (2021) 26(17), 5419. https://doi.org/10.3390/molecules26175419
64. Aoudjit L, Martins PM, Madjene F, Petrovykh DY, Lanceros-Mendez S. Photocatalytic reusable membranes for the effective degradation of tartrazine with a solar photoreactor. Journal of Hazardous Materials, (2018) 344, 408-416, https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.053

doi: 10.25100/iyc.v28i3.16132